

MÜHENDİSLİK ALANINDA ARAŞTIRMA YÖNTEMLERİ VE YENİLİKÇİ UYGULAMALAR



EDİTÖRLER
PROF. DR. BİROL KILIÇ
DR. ÖĞR. ÜYESİ SITKI ALPER ÖZDEMİR



DOI: 10.5281/zenodo.18096054

Mühendislik Alanında Araştırma Yöntemleri ve Yenilikçi Uygulamalar

Editörler

Prof. Dr. Birol Kılıç

Dr. Öğr. Üyesi Sıtkı Alper Özdemir

İmtiyaz Sahibi
Platanus Publishing®

Editör
Prof. Dr. Birol Kılıç & Dr. Öğr. Üyesi Sıtkı Alper Özdemir

Kapak & Mizanpaj & Sosyal Medya
Platanus Yayın Grubu

Birinci Basım
Aralık, 2025

Yayımcı Sertifika No
45813

ISBN
978-625-8513-06-6

©copyright
Bu kitabın yayım hakkı Platanus Publishing'e aittir. Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin alınmadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Adres: Natoyolu Cad. Fahri Korutürk Mah. 157/B, 06480, Mamak,
Ankara, Türkiye.

Telefon: +90 312 390 1 118
web: www.platanuspublishing.com
e-mail: platanuskita@gmail.com



Platanus Publishing®

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1	9
<i>Orman Yangınlarının Tespiti ve İzlenmesinde Kullanılan Teknolojik Yöntemler</i>	
Mehmet Dursun & Taner Dindar	
BÖLÜM 2	17
<i>Türkiye ve Dünyada Sulama Suyu Fiyatlandırması: Yönetişim, Politikalar ve İklim Değişikliği Bağlamında Bir Karşılaştırma</i>	
Zeynep Zaimoglu	
BÖLÜM 3	39
<i>Agrifotovoltaik Sistemler (APV/AV): Gıda–Enerji–Su Bağlantısında Yeni Bir Kavramsal Çerçeve Ve Çukurova Uygulaması</i>	
Zeynep Zaimoglu	
BÖLÜM 4	53
<i>Retinal Damar Morfolojisinin Görüntü İşleme Destekli Nicel Analizi için Ağırlıklı Eğrilik Tabanlı Kıvrımlılık Skoru Tespiti</i>	
Güray Sonugür	
BÖLÜM 5	63
<i>Biyomalzeme Uygulamalarında Yüksek Entropi Alaşımları</i>	
Nuri Ergin & Zeynep Semen & Şevval Yılmaz & Sude Nas Alakuş	
BÖLÜM 6	79
<i>Refrakter Yüksek Entropi Alaşımları</i>	
Nuri Ergin & Necati Koçak & Kamile Kavuncioğlu & Feyza Yiğit	
BÖLÜM 7	95
<i>Li-İyon Piller İçin Kalay Esaslı Anot Malzemeleri</i>	
Miraç Alaf	
BÖLÜM 8	115
<i>Derin Öğrenme Teknikleri Kullanılarak Rektal Kanserde Bir Vaka Çalışması</i>	
Nihan Ozbaltan & Cemre Doğan	
BÖLÜM 9	161
<i>Süpersonik Hızlı Mermilerin Zırhlarda Yarattığı Balistik Hasar Etkilerinin İncelenmesinde Kullanılan Nümerik ve DeneySEL Yöntemler</i>	
Mehmet Çalışkan	

BÖLÜM 10.....	175
LI-ION Batarya Yönetim Sistemlerinde Yapay Zekâ Tabanlı SOH ve SOC Tahmini	
Ayhan Aydın	
BÖLÜM 11.....	187
İş Güvenliği İyileştirme Çalışmalarında CPM-PERT Uygulaması	
Ulviye Polat	
BÖLÜM 12.....	203
GaN Tabanlı Dört Anahtarlı Buck-Boost Dönüştürücünün Verim ve Genel Davranışı Üzerinde Anahtarlama Frekansının Etkisi	
Buğra Er & Okan Bingöl	
BÖLÜM 13.....	217
RF ve Mikrodalga Sistemlerinde Metayüzey Tabanlı Yaklaşımlar: Tasarım İlkeleri ve Güncel Eğilimler	
Muhammed Malkoç	
BÖLÜM 14.....	233
Geleneksel Ürün Adı ve Mahreç İşareti ile Tescillenen Gıdaların Üretiminde Kullanılan Ekipmanların Gıdaya Temasa Uygunluğu	
Sibel Özçakmak	
BÖLÜM 15.....	255
Cevherleşme Süreci Sonucunda Oluşan Bakır Atıklarının Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı	
Muhammed Enes Türk & Mehmet Hayrullah Akyıldız	
BÖLÜM 16.....	265
İnşaat Mühendisliğinde Yapay Zekâ Uygulamaları	
Mehmet Hayrullah Akyıldız & Muhammed Enes Türk	
BÖLÜM 17.....	285
Uydu Görüntüleri ile Buzul Gerilemesinin İzlenmesi: Upsala Buzulu Örneği	
Gizem Eyi & İlkey Buğdaycı	
BÖLÜM 18.....	299
Matlab Kullanarak Görüntü Segmentasyon Algoritmalarının Karşılaştırılması	
Serkan Keser	

BÖLÜM 19	315
Elektrikli Araçlarda Kullanılan Yeşil Kompozitler	
Ahmet Özgür Ağırgan & Mehtap Ağırgan	
BÖLÜM 20	337
Endüstri 4.0 Perspektifinde Montaj Odaklı Tasarım: Prensipler ve Uygulamalar	
Tuğçe Tezel & Volkan Kovan	
BÖLÜM 21	351
Döngüsel Ekonomi Ekseninde Sürdürülebilir Ürün Tasarımı ve Geri Dönüşüm Stratejileri	
Tuğçe Tezel & Volkan Kovan	
BÖLÜM 22	365
Derin Öğrenme Tabanlı Kenar Tespit Yöntemleri	
Selami Parmaksızoğlu	
BÖLÜM 23	389
Peynir Üretiminde Alternatif Peynir Enzimlerinin Kullanımı ve Peynir Kalitesi Üzerine Olan Etkileri	
Berke Boran Varlı & Selda Bulca	
BÖLÜM 24	407
Mikroabrazyon	
Yılmaz Küçük	
BÖLÜM 25	423
Enerji Depolama Yöntemleri	
Muhammet Özdoğan	
BÖLÜM 26	455
Elektrikli Araçlarda Kullanılan Lityum-İyon Tabanlı Batarya Hücrelerin İncelenmesi	
Mehmet Akif Kılınç & Ali Şentürk & Okan Bingöl	
BÖLÜM 27	475
Ekonomizer Kullanımıyla Atık Isı Geri Kazanımının Değerlendirilmesi	
Neşe Taşdemir & Mustafa Tahir Akkoyunlu & Alparslan Turanboy	

BÖLÜM 28.....	493
Kazan Sisteminde Brülör Ayarı Yapılması	
Muhammet Şaka & Mustafa Tahir Akkoyunlu & Alparslan Turanboy	
BÖLÜM 29.....	515
Antroposen Çağında Mikroplastikler: Kaynaklar, Taşınım Dinamikleri ve Küresel Ekolojik Riskler	
Rozelin Aydın & Özge Petek Köseadağ & Fatma Pelin Altınar Kara	
BÖLÜM 30.....	545
Uçaklarda Elektrik Enerjisi Üretimi	
Mehmet Dursun	
BÖLÜM 31.....	555
Temassız Kırmataş Agregaların Şekilsel Özelliklerinin Görüntü İşleme Yöntemiyle Elde Edilmesi	
İbrahim Yiğit	
BÖLÜM 32.....	565
Atık Polietilen Tereftalat (PET) Malzemenin Yapı Malzemesi Olarak Kullanım Alanları	
Altan Yılmaz & Esra Osmanbeyoğlu	
BÖLÜM 33.....	579
Nesnelerin İnterneti (Iot) İçin Güvenli Veri Akışı Tasarımı	
Salih Erdurucan & Ayhan Aydın	
BÖLÜM 34.....	593
Kimyasal ve Elektrokimyasal Enerji Dönüşümleri	
Elif Yıldızlılar & Ahmet Yönetken	
BÖLÜM 35.....	623
Tahıl Kaynaklı Arabinoksilanlar: Yapı, Ekstraksiyon ve Sağlık Üzerine Etkileri	
Hilal Arslan Bayrakçı	
BÖLÜM 36.....	645
İnsan Makine Etkileşimi ve Yapay Zekada Vicdan Kavramı: Güncel Etik Yaklaşımlar	
Cihan Yalçın	

BÖLÜM 37	669
Büyük Çapta Kompleks Geometrilili, Yekpare Kilitleme Mekanizmalı ve Hassas Toleranslı Fren Piston İç-Dış Sızdırmazlık Kiti Tasarım ve Prototip Üretimi	
Nurettin Baran Revan & Meliha Naz Ediz & Tolga Umutlu & Çağlar Tuncel & Erva Nur Poyraz & Ezgi Özgünerge Falay & Öz Erman Arusan & Engin Tan & İsmail Ovalı	
BÖLÜM 38	697
Doku Mühendisliğinin Biyomekanik Sınırı: Rejeneratif Tıp için İskele Tabanlı Stratejilerin Kapsamlı Bir Analizi	
Ahmet Koluman & Aleyna Sure Öztürk	
BÖLÜM 39	725
Depo Yönetiminde Bilişim Teknolojileri	
Ayca Kama	
BÖLÜM 40	733
Taş Mastik Asfalt Karışımlarda Bitüm Modifikasyonu	
Hande Varol Morova	
BÖLÜM 41	741
Radyolojik Olarak Atmosferik Dağılım	
Hüseyin Şahiner	
BÖLÜM 42	753
Elektrikli Araçların Sürdürülebilir Ulaşım Sistemlerindeki Rolü: Şarj, Batarya ev Enerji Çerçevesinde Bir Değerlendirme	
Hakan Yüksel	
BÖLÜM 43	769
Ağlarda Merkezi Düğümler: Temel Kavramlar ve Uygulama Alanları	
Onur Uğurlu	
BÖLÜM 44	779
Gri Belirsiz Faaliyet Süreli Proje Çizelgeleme Analizi	
Remziye Buse İyigün & Erdal Aydemir	
BÖLÜM 45	791
Nükleer Enerji Santrallerinde Kritik Malzemeler	
Güven Yarkadaş	

BÖLÜM 1

Orman Yangınlarının Tespiti ve İzlenmesinde Kullanılan Teknolojik Yöntemler

Mehmet Dursun¹ & Taner Dindar²

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Havacılık ve Uzay bilimleri Fakültesi, Havacılık Elektrik Elektronik Bölümü, ORCID: 0000-0002-0558-6309

² Öğretim Görevlisi, Ankara Üniversitesi, Nallıhan Meslek Yüksek Okulu Elektronik Otomasyon Bölümü, ORCID NO: 0000-0002-4112-2114

1. GİRİŞ

Günümüzde küresel ısınmanın da etkisiyle yazları oldukça kurak geçmekte ve yüksek sıcaklık değerleri ile karşı karşıya kalınmaktadır. Bu durum yaşamı, canlıları ve bitki örtüsünü doğrudan ya da dolaylı olarak olumsuz yönde etkilemektedir. Örneğin sıcaklık değerlerindeki bu artış orman yangınlarının ortaya çıkmasında önemli bir etkindir.

Son zamanlarda yaşanan orman yangınları hem ülkemizde hem dünyada geleceğimizi tehdit eder boyutlara ulaşmakta, sonuçları ağır, yıkıcı, tamiri mümkün olamayan ya da çok uzun yıllar sonrasında eski halini alabilecek çevresel kayıplara sebep olmaktadır. Bu yangınlar hızlı bir şekilde yayılarak bazen kırsalda bir köyü bazen şehir merkezine kadar ulaşarak yaşamın yoğun olarak sürdürüldüğü alanları yok etmektedir (Zhou vd.,e arkadaşları 2023).

Ormanlar toplumun doğrudan veya dolaylı olarak ekonomik, sosyal, kültürel ve politik yararlar sağladığı alanlardır. İçinde bulunduğu bölgenin toprak yapısına, iklimine, hayvan çeşitliliğine, bölgedeki nüfusun ekonomik hayatına ve hatta halk sağlığına doğrudan ya da dolaylı katkıları vardır (Saatçioğlu ve arkadaşları 1974). Ormanlar ekonomik olarak da toplumları desteklemektedir. İnşaat ve mobilya sektörü ham madde ihtiyacını özellikle bu amaç için yetiştirilen ürünler ile sağlamaktadır.

Ormanların tahrip edilmesi biyolojik çeşitliliğin azalması, karbon emisyonlarının kontrolü, ağaç sanayinin hammadde ihtiyacının karşılanamaması, erozyon gibi afetlerin oluşumu vb. birçok konu bakımından büyük risk barındırmaktadır.

Ormanların insan eli ile ya da doğal etkenler sebebi ile tahrip edilmesi bu konularda önlem alınması ihtiyacını doğurmuştur. Özellikle bilerek ya da bilmeden insan eli ile yapılan tahribatların en aza indirilmesi için hem hukuki hem de fiili önlemler alınmaktadır.

Fiili olarak orman tahribatlarının önlenmesinde izleme oldukça önem kazanmıştır. İzleme doğrudan bu iş için görevlendirilmiş personel ile yapılmakla birlikte yoğun bir insan kaynağı gerektiren bu yöntem çok etkili değildir. Manuel izlemede tespit hızı çoğu zaman çok yavaş kalmakta, aynı anda belirli alanlarda hizmet verebilmeleri de düşünüldüğünde yangın tespitinde sınırlı etkiye sahip oldukları görülmektedir (Bouguettaya ve arkadaşları 2022).

Orman yangınları sebebiyle meydana gelen tahribat önlem alınmaz ise çok kısa süre içerisinde büyümekte ve kontrol altına alınamaz bir hal almaktadır. Bu sebeple kontrol edilmesi ve yangının söndürülmesinde erken tespit ve erken müdahale oldukça önem kazanmaktadır.

Geleneksel izleme yöntemlerinin dezavantajları daha etkili çözümlere odaklanmayı gerektirmiştir. Gelişen teknolojiler ile ilk olarak sensör tabanlı algılama daha sonra ise yapay zeka destekli bilgisayarlı görme teknikleri kullanılarak uzaktan tespit ön plana çıkmıştır. Geleneksel izleme olarak bilinen yöntemlerden duman yoğunluğunun ölçümü, termal etki ölçümü ve yanıcı gaz algılama en çok bilinen ve yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir.

Havadan izleme insanlı ve insansız hava araçları ve uydular aracılığı ile yapılabilmektedir (Breejen ve arkadaşları 1998). İnsanlı hava araçları çoğu zaman tehlike boyutları dikkate alındığında pilotun hayatını tehlikeye atmamak adına kısıtlı alanlarda görev icra edebilmektedir. Ayrıca pilot eğitimleri, bakım masrafları pilotlu gözetimi dezavantajlı kılmaktadır.

Uydular ise hem geliştirilmesi hem uzaya fırlatılması hemde uzay görevlerinin icrası konusunda maliyeti yüksek operasyonlardır. Bu sebeple son zamanlarda insansız hava araçlarındaki (İHA) gelişmeler ve bu alandaki üretim yoğunluğu izleme faaliyetlerinde özellikle küçük ölçekli İHA kullanımını avantajlı hale getirmektedir (Casbeer ve arkadaşları 2006).

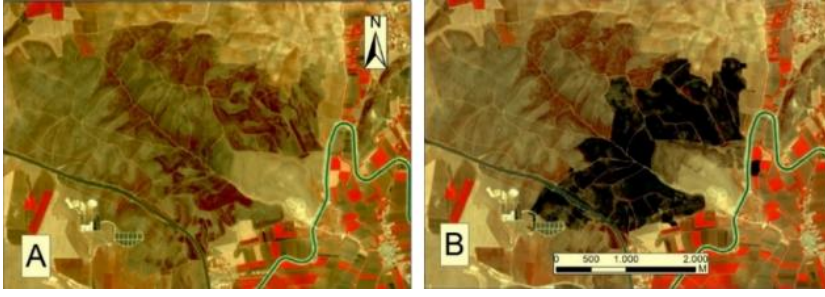
Orman yangınlarının görüntü tabanlı tespitinde ilk olarak havadan çekilen görüntüler kullanılmıştır. Anlık gerçek zamanlı olmayan bu görüntüler üzerinde farklı görüntü işleme ve segmentasyon yöntemleri kullanılarak tespitler yapılmaya başlanmıştır. Buradan elde edilen başarımlar İHA' lara monte edilen kameralar yardımıyla alınmış ve gerçek zamanlı görüntüler üzerinde analizler yapılarak anlık tespiti mümkün hale gelmiştir (Bouguettaya arkadaşları).

2. ALGILAMA VE TESPİT TEKNİKLERİ

Orman yangınlarının tespit edilmesi ve izlenmesi amacıyla bir çok teknik kullanılmaktadır. Teknolojik gelişmeler ile birlikte kendini güncelleyen bu teknikler kısaca şunlardır.

2.1. Uydu Kaynaklı Görüntüler ile Algılama ve Tespit

Meydana gelen orman yangınlarının algılanması ve hasar tespiti için kullanılan yöntemlerdir biri uydular aracılığı ile yapılan yangın tespiti ve gözlemleridir. Özellikle çok bantlı uydu sistemleri ile yangının devam eden eğilimi, meydana gelen hasarın tespiti, bitki örtüsündeki değişimler ve yangın büyüklüğünün sınıflandırılması sağlanmaktadır. Genellikle tespit ve algılama için alçak irtifa uyduları (LEO) ve Yerdurağan (GEO) uyduları kullanılır (Aksu 2003). Bu uydulardan LEO' nun yerküre uzaklıkları 200 ile 3000 km GEO' nun ise 36000 km civarındadır (Bayhan ve Alagöz 2007). Her ne kadar bu görüntüler yardımıyla elde edilen tespitler yangın ile ilgili önemli bilgiler içerse de günümüz koşullarında kısıtlı kalmaktadırlar. Özellikle uzak mesafeden elde edilen görüntüler düşük çözünürlük sebebi ile kesin sonuçlar vermekte zorlanmaktadır.

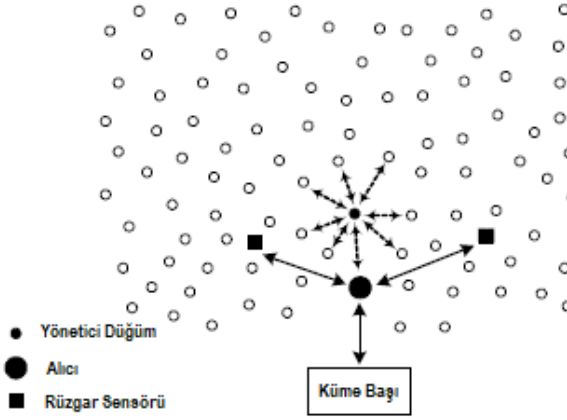


Şekil 1. Bir bölgenin yangın öncesinde (A) ve yangın sonrasında (B) alınan uydu görüntüleri (Polat ve Kaya 2021)

Örneğin yanan alandaki bitki örtüsü tür tespiti, yangın alanının kesin sınırlarının belirlenmesi konularında çoğu zaman yeterli bilgiyi elde etmek mümkün olamamaktadır. Ayrıca uyduların kullanımı belirli prosedürleri ve izinleri gerektirdiğinden bilgilere anlık erişimler de oldukça zordur.

2.2. Sensör Ağları Yardımıyla Algılama ve Tespit

Orman yangınlarının algılanmasında kullanılan tekniklerden biri de sensör ve sensör ağları yardımıyla yangınların tespitidir. Burada kullanılan sensörler yangın sebebiyle ortaya çıkan ısı yayılımının tespiti ya da yangın ile ortaya çıkan dumanın tespiti ile algılama yapmaktadır. Hızlı ve doğru algılamaların sağlanabilmesi için kullanılan sensörler alana homojen ve yeteri miktarda yerleştirilir. Bu yapı sensör düğümü olarak adlandırılır ve bu düğümlerin bağlı bulunduğu küme başlıkları sisteme eklenir. Her düğüm ortamdaki sıcaklığı, bağıl nem seviyesini ve duman durumunu sürekli olarak izler. Bu ölçüm bilgilerine ek olarak konum ve zaman bilgiside eklenerek tüm veri ilgili küme başlığına aktarılır. Küme başlıkları ise bu bilgileri paket halinde alıcı aracılığıyla yönetici düğüme gönderir. Alıcı aynı zamanda sensör düğümlerinden az sayıda olmak üzere sadece belirli noktalara konumlandırılmış ve kablolu olarak alıcılara bağlanmış durumdaki rüzgar sensörlerinden almış olduğu rüzgar yönü ve hızı bilgilerini de yine yönetici düğüme gönderir. Yönetici düğüm ise kullanıcılara tüm bu bilgiler doğrultusunda iki tür veri sağlar. Birinci veri ortaya çıkan anormal bir olayın varlığıdır. Bu anormal olay aşırı sıcaklık yükselmesi, duman tespiti gibi yangının habercisi olabilecek verilerdir. İkinci veri olarak sahadaki ölçüm araçlarından elde edilen bilgiler doğrultusunda her bir küme alanında anlık orman yangını çıkma tehlikesi oransal olarak kullanıcıya sunulur. Ayrıca kullanıcının istenilen herhangi bir zamanda herhangi bir bölgedeki verileri sorgulamasına da izin verilebilmektedir. Şekil 2. de Liyang Yu ve arkadaşları tarafından tasarlanan bu sisteme ait bir sensör ağ yapısı görülmektedir.



Şekil 2. Orman yangını tespiti için tasarlanmış kablosuz sensör ağı (Yu ve arkadaşları 2005)

2.3. Bilgisayarlı Görü Tabanlı Algılama ve Tespit

Bilgisayarlı görü görüntülerden hedef bir paterni, bir nesneyi doğru ve etkin bir şekilde otomatik olarak tanımak için kullanılan teknolojiler bütünüdür. Görüntüler üzerinde kamera bulunan bir telefondan, kişisel bir bilgisayardan, üzerinde kamera bulunduran bir İHA' dan yada bir sağlık merkezinde tomografi, röntgen yada manyetik rezonans cihazından elde edilmiş bir görüntü olabilir. Bu görüntüler üzerinden kimi zaman bir nesne tespiti, kimi zaman bir insan yüzü tespiti, kimi zaman bir hayvan tespiti, kimi zamanda kanserli bir dokunun tespiti yapılabilmektedir. Ayrıca güvenlik amaçlı kamera ile izleme yapılan mekanlarda elinde ateşli bir silah bulunan yada bir bıçak bulunan şahsın tespitinden, evde bakım hizmetlerinde bakıma muhtaç bireyin ev içerisinde düşmesinin tespitine kadar gerçek hayatta karşımıza çıkabilecek bir çok problemin tespiti ve çözümü için bilgisayarlı görü sistemlerinden faydalanılmaktadır (Singh ve arkadaşları 2019).

Yangın algılama sistemlerinde görüntünün işlenmesi ile anlık olarak yada kayıtlı bir görüntü üzerinden sonrasında algılama ve tespit işlemleri gerçekleştirilebilmektedir. Bu görüntülerin kaynakları uydu, insanlı yada insansız hava araçları, sabit kamera görüntüleri olabilir. Uydulardan elde edilen görüntüler yardımıyla algılama çalışmanın ilk kısmında anlatılmıştır. Mesafe sebebi ile küçük yangınları tanımlayamaması, bulutlardan etkilenmesi dezavantajlı kısımları olarak anlatılmıştır.

İnsanlı ve insansız hava araçlarından alınan veriler hem anlık olarak alınabilmekte hemde çok yakın mesafeden görüntü alınabildiği için yangın tespiti daha hızlı bir şekilde yapılabilmektedir. Sürekli alınan görüntüler yardımıyla yer

ekiplerinin yönlendirilmeleri de kolaylıkla sağlanabilmektedir (Grari ve arkadaşları 2022).

Her ne kadar yakından görüntü almak mümkün olsada bazen dumanların altında kalan alevli alanların tespitinde zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu ve benzeri zorluklar makine öğrenmesi ve derin öğrenme tabanlı yaklaşımlar ile aşmaya çalışılmıştır. Halen bu alandaki iyileştirme çalışmaları farklı algoritmaların gelişimleri ve uygulamaları ile devam etmektedir (Harkat ve arkadaşları 2025). Evrişimsel Sinir Ağları (CNN), Yanlızca Bir Kez Bak (YOLO) en yaygın kullanılan algoritmalar arasında sayılabilir. Şekil 3 de YOLO-LFD ve YOLOv5s yöntemleri kullanılarak alev tespitine ilişkin bir örnek gösterilmiştir (Wang ve arkadaşları 2025).



Şekil 3. YOLO algoritmasının farklı versiyonlarının (YOLO-LFD ve YOLOv5s) orijinal görüntüye uygulanmış halleri

SONUÇLAR

Ormanlar yaşadığımız çevrenin vazgeçilmez koruyucularıdır. Bu alanların zarar görmesi sadece bitki örtüsünde meydana gelen bir değişimin çok ötesidir. Bu sebeple ormanlarda özellikle yangın kaynaklı yıkıcı tahribatların önlenmesi, var olanların ivedi olarak tespit edilmesi ve sonlandırılması oldukça önemlidir.

Ormanları etkileyen yangınların algılanması ve izlenmesinde farklı yöntemler kullanılmakla birlikte bunların birbirlerine karşı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Gelişen teknolojiler ile birlikte daha yangının oluşmadan risk analizlerinin yapılması, takip edilmesi çıkabilecek yangınların daha oluşmadan önlenmesinde son derece önemlidir.

Uydu kaynaklı izleme, uyduların yeryüzüne olan uzaklıkları dikkate alındığında net ve anlık bilgi verme konusunda yetersiz kalabilmektedir. Uydu işletmelerini kullanabilmenin yasal prosedürleri kolay veri elde etme önünde bir engel teşkil etmektedir. Ama uyduların sağlamış olduğu görüntülerin büyük alanları en hızlı şekilde görüntüleyebilme kabiliyetleri kullanımlarını gerekli kılmaktadır.

Orman yangınlarının algılanması ve izlenmesinde sensör ağları oldukça değerli bilgiler sunmaktadır. Toplanan fiziksel bilgiler veri paketleri halinde izleme ve değerlendirme merkezlerine iletilebilmekte ve daha yangın çıkmadan bu riskler değerlendirilip gerekli önlemlerin alınması sağlanabilmektedir. Fakat sensör ağları dar alanlardan veri toplayabildikleri için büyük alanlarda kurulum maliyetleri açısından zorlayıcı olabilmektedir. Çevresel yada donanımsal olarak zarar gören sensörlerin yenileri ile değiştirilmeleri gibi durumlar dikkate alındığında ise bakım, onarım ve kalibrasyon giderleri dezavantajları arasında sayılabilmektedir.

Bilgisayarlı görü temelli orman yangınları algılanma ve izleme sistemleri özellikle kullanılan insansız hava araçları ile daha kısa mesafelerden görüntü alabilme kabiliyetlerine sahiptir. Ayrıca istenilen alanlara bölgelere hızlı erişimleri de dikkate alındığında hem izleme merkezlerine hemde yer ekiplerine yangına müdahale ve izleme açısından önemli bilgiler sunmaktadır. Yapay zeka, makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemlerinin bu görüntüler üzerinde kullanılmasıyla alandaki sabit kameradan gelen bir görüntü bile çok küçük alanlarda başlayan yangınları tespit ederek gerekli müdahalenin yapılma süresini kısaltmaktadır. Böylece yangının büyümesini engelleyerek kontrol altına alınmasında önemli rol oynamaktadır.

KAYNAK

- Zhou, X., Yang, J., Niu, K., Zou, B., Lu, M., Wang, C., ... & Huang, H. (2023). Assessment of the forest fire risk and its indicating significances in Zhaoqing city based on Landsat time-series images. *Forests*, 14(2), 327.
- Saatçioğlu, F. (1974). Ormanların genel hizmetleri ve Türkiye ormancılığının önemi. *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, 16-23.
- Bouguettaya, A., Zarzour, H., Taberkit, A. M., & Kechida, A. (2022). A review on early wildfire detection from unmanned aerial vehicles using deep learning-based computer vision algorithms. *Signal Processing*, 190, 108309.
- Den Breejen, E., Breuers, M., Cremer, F., Kemp, R., Roos, M., Schutte, K., & De Vries, J. S. (1998). *Autonomous forest fire detection* (pp. 2003-2013). Coimbra, Portugal: ADAI-Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial.
- Casbeer, D. W., Kingston, D. B., Beard, R. W., & McLain, T. W. (2006). Cooperative forest fire surveillance using a team of small unmanned air vehicles. *International journal of systems science*, 37(6), 351-360.
- Aksu, Ö. B. (2003). IP theory and applications in satellite communication.
- Bayhan, S., Alagöz, F., & Laboratuvarı, U. A. Uydu Agları Yonlendirme Protokolleri: Problemler Ve Sunulan Bazı Coz Umler.
- Polat, N., & Kaya, Y. (2021). Çok banlı uydu görüntüleriyle orman yangınlarında hasar tespiti. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 23(1), 172-181.
- Valente de Almeida, R., & Vieira, P. (2017). Forest Fire Finder–DOAS application to long-range forest fire detection. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(6), 2299-2311.
- Yu, L., Wang, N., & Meng, X. (2005, September). Real-time forest fire detection with wireless sensor networks. In *Proceedings. 2005 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2005*. (Vol. 2, pp. 1214-1217). Ieee.
- Singh, T., & Vishwakarma, D. K. (2019). Video benchmarks of human action datasets: a review. *Artificial Intelligence Review*, 52(2), 1107-1154.
- Grari, M. O. U. N. I. R., Yandouzi, M. I. M. O. U. N., Idrissi, I. D. R. I. S. S., Boukabous, M. O. H. A. M. M. E. D., Moussaoui, O. M. A. R., Azizi, M. O. S. T. A. F. A., & Moussaoui, M. I. M. O. U. N. (2022). Using IoT and ML for forest fire detection, monitoring, and prediction: a literature review. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 100(19), 5445-5461.
- Harkat, H., Ahmed, H. F. T., Nascimento, J. M., & Bernardino, A. (2025). Early fire detection using wavelet based features. *Measurement*, 242, 115881.
- Wang, H., Zhang, Y., & Zhu, C. (2025). YOLO-LFD: A Lightweight and Fast Model for Forest Fire Detection. *Computers, Materials & Continua*, 82(2).

BÖLÜM 2

Türkiye ve Dünyada Sulama Suyu Fiyatlandırması: Yönetişim, Politikalar ve İklim Değişikliği Bağlamında Bir Karşılaştırma

Zeynep Zaimoglu¹

¹ Prof. Dr., Çukurova Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü
Orcid: 0000-0002-9573-4781

1. GİRİŞ

Dünya genelinde hızla artan nüfus, kentleşme süreçleri, sanayi ve tarımsal üretimdeki genişleme ile birlikte su kaynakları üzerindeki baskı her geçen yıl daha da artmaktadır. Tatlı suyun sınırlı olması ve mekânsal olarak eşitsiz dağılması, özellikle sulama suyu yönetimini küresel düzeyde en öncelikli politika alanlarından biri haline getirmiştir. Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) 2022 raporuna göre, tarım sektörü dünya üzerindeki tatlı su çekimlerinin yaklaşık %72'sini oluşturarak tüm sektörler arasında en yoğun kullanıcı konumundadır (FAO, 2022). Bu oran, hem gelişmekte olan ülkelerde hem de gelişmiş ekonomilerde suyun tarımsal üretimdeki belirleyici rolünü göstermektedir. Sulama suyu fiyatlandırması bu nedenle yalnızca bir ekonomik enstrüman olarak değil; su verimliliği, gıda güvenliği, ekosistem sağlığı ve kırsal refahı doğrudan etkileyen bir yönetim aracı olarak önem kazanmaktadır.

Dünyada su yönetimi ve fiyatlandırma politikaları ülkelerin ekonomik gelişmişlik seviyeleri, iklim koşulları, sulama teknolojileri ve kurumsal yapıları gibi birçok faktöre bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Örneğin Avrupa Birliği ülkelerinde sulama suyu ücretlendirmesi büyük oranda “kullanıcı öder” prensibine dayalı olup volumetrik (m^3/ha) ölçümler üzerinden yapılırken (OECD, 2021), Güney Asya ülkelerinde hâlen yüzey sulama sistemlerinde hektar başı sabit ücretlendirme yaygındır (World Bank, 2020). Latin Amerika’da ise su kullanıcı birlikleri (Water User Associations – WUAs) tarafından yürütülen topluluk temelli fiyatlandırma modelleri güçlü bir yer bulmaktadır (IMF, 2023). Bu çeşitlilik, sulama suyu fiyatlandırmasının teknik olduğu kadar sosyo-ekonomik ve kurumsal bir mesele olduğunu göstermektedir.

Türkiye bağlamında değerlendirildiğinde, su kıtlığı riski ve iklim değişikliği etkileri sulama suyu yönetimini tarihsel olarak önemli hale getirmiş, ancak 2010’lu yıllardan sonra hız kazanan kuraklık trendleri, DSİ yatırımlarındaki dönüşüm, sulama birliklerinin yeniden yapılandırılması (2011 ve 2017 düzenlemeleri) ve 2023 Su Verimliliği Strateji Belgesi ile bu konu stratejik bir ulusal politika alanına dönüşmüştür. Türkiye yarı kurak iklim kuşağında yer almakta, yıllık ortalama yağış 574 mm ile dünya ortalamasının (990 mm) oldukça altında seyretmektedir (MGM, 2023). Ayrıca son 20 yılda yağışların düzensizleşmesi, yaz sıcaklıklarının artması ve 2020 sonrası Türkiye genelinde görülen meteorolojik ve hidrolojik kuraklıklar, tarımsal sulamada suyun rasyonel kullanımını zorunlu kılmıştır (DSİ, 2023b; IPCC, 2021).

Türkiye’de tarımsal sulama; Devlet Su İşleri (DSİ), sulama birlikleri, kooperatifler ve belediyeler gibi farklı kurumsal aktörlerin yönettiği karma bir yapıya sahiptir. Özellikle DSİ’nin tarihsel olarak uyguladığı hektar başı ücretlendirme modeli, 2000’li yıllardan itibaren kademeli ve volumetrik tarife türlerine doğru evrilmiştir (DSİ, 2022). Ancak bu dönüşüm tüm bölgelerde eş zamanlı ve homojen gerçekleşmemiştir. GAP havzası, Çukurova, Konya Kapalı

Havzası ve Trakya gibi tarımsal üretimi yüksek bölgelerde su talebi ve iklim baskısının artması, fiyatlandırma politikalarında bölgesel farklılaşmayı da beraberinde getirmiştir. Örneğin Güneydoğu Anadolu Projesi (GAP) bölgesinde yüzey sulamadan basınçlı sulama sistemlerine geçiş su verimliliğini artırırken, Konya Kapalı Havzası'nda yeraltı suyu çekimlerinin artması sulama suyu fiyatlandırmasını daha karmaşık hale getirmiştir (World Bank, 2021; Aküzüm, 2019).

2023 yılında yayımlanan Türkiye Su Verimliliği Stratejisi ve Eylem Planı (2023–2030), sulama suyu fiyatlandırmasında verimlilik temelli bir yaklaşımı benimsemiş, suyun gerçek maliyetinin aşamalı olarak yansıtılması, kayıp–kaçak oranlarının azaltılması ve modern sulama teknolojilerinin desteklenmesi gibi önemli hedefler ortaya koymuştur (T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, 2023). 2024 yılı tarımsal sulama tarifeleri ise DSI' nin yeni maliyetlendirme yaklaşımının somut bir yansımasıdır ve birçok bölgede kademeli/volumetrik fiyatlandırmanın ağırlığının arttığını göstermektedir (DSİ, 2024).

İklim değişikliği bağlamında sulama suyu fiyatlandırması, yalnızca mali bir düzenleme değil, adaptasyon politikalarının temel bileşenlerinden biridir. IPCC (2021) raporları Akdeniz Havzası'nın iklim değişikliğine karşı en kırılgan bölgelerden biri olduğunu, Türkiye' nin ise artan sıcaklık, azalan yağış, artan evapotranspirasyon ve su talebi baskısı ile karşı karşıya olduğunu belirtmektedir. Bu nedenle fiyatlandırma politikalarının hem çiftçi davranışlarını yönlendirmesi hem de suyun daha verimli kullanımını teşvik etmesi beklenmektedir. Nitekim OECD (2021) çalışmaları volumetrik fiyatlandırmanın su tasarrufu üzerinde daha güçlü bir etki yarattığını göstermektedir.

Dünya Bankası (2020) ve IMF (2023) analizleri su yönetiminin aynı zamanda sosyal denge ve kırsal kalkınma açısından da hassas bir konu olduğunu ortaya koymaktadır. Sulama suyu ücretlerinin ani artışı küçük ölçekli üreticiler için maliyet baskısı yaratmakta; bu nedenle fiyatlandırma politikalarının sosyal politika araçlarıyla desteklenmesi, özellikle düşük gelirli çiftçiler için önem taşımaktadır.

Bu kitap bölümünün amacı, dünya ve Türkiye'de sulama suyu fiyatlandırma yaklaşımlarını, kurumsal yapıları, bölgesel farklılıkları, iklim değişikliği etkilerini ve uluslararası iyi uygulamaları karşılaştırmalı bir çerçevede incelemektir. Bölüm; yönetim modelleri, fiyatlandırma mekanizmaları, DSI'nin tarihsel rolü, sulama birliklerinin dönüşümü, tarife türleri, Türkiye'de 2024 uygulamaları ve AB-OECD ülkeleri ile karşılaştırmalar üzerinden kapsamlı bir analiz sunmayı amaçlamaktadır. Böylece hem politika yapıcılar hem araştırmacılar hem de su yönetimi alanındaki profesyoneller için bütüncül bir değerlendirme ortaya konulacaktır.

2. SULAMA SUYU FİYATLANDIRMA YAKLAŞIMLARI

Dünyada sulama suyu fiyatlandırması genel olarak alan bazlı, kademeli tarifeli ve volumetrik (hacimsel) olmak üzere üç ana modele dayanmaktadır. Ülkelerin tercihleri; kurumsal kapasite, su kıtlığı seviyesi, çiftçi profili, teknolojik altyapı ve kamu politikaları gibi faktörlere göre farklılık göstermektedir (OECD, 2020; FAO, 2022).

2.1- Alan (hektar) bazlı fiyatlandırma

Alan (hektar) bazlı sulama suyu fiyatlandırması, sulama suyunun kullanım miktarından bağımsız olarak sulanan tarla büyüklüğü üzerinden ücretlendirildiği en sade ve en eski fiyatlandırma modellerinden biridir. Bu modelde çiftçiler kullandıkları suyun metreküp veya litre bazında ölçülmesine gerek olmaksızın, suladıkları hektar başına sabit bir ücret öderler. Sayaç, debimetre ya da dijital izleme gibi herhangi bir teknik altyapıya ihtiyaç duymaması modelin en belirgin avantajıdır; bu nedenle idari yönetim kolaylığı ve düşük işletme maliyeti sağlar. Özellikle büyük ve dağınık tarım alanlarının bulunduğu, su dağıtım altyapısının karmaşık olmayan veya modern ölçüm sistemlerinin henüz yerleşmediği ülkelerde uygulanabilirliği yüksektir. Türkiye, Hindistan, Pakistan gibi geniş tarım alanlarına sahip ülkelerde uzun yıllar boyunca bu yöntemin kullanılması, hem başlangıç maliyetlerinin düşük olması hem de çiftçiler açısından anlaşılır ve öngörülebilir bir maliyet yapısı sunmasından kaynaklanmaktadır.

Bununla birlikte alan bazlı fiyatlandırma, su yönetimi ve sürdürülebilirlik açısından önemli sınırlılıklar taşır. Su tüketimi ile ödeme arasında doğrudan bir ilişki olmadığı için çiftçiler daha fazla su kullanmaları durumunda ek bir maliyetle karşılaşmaz; bu da su tasarrufu davranışını teşvik eden ekonomik sinyallerin zayıflamasına yol açar. Özellikle su kıtlığının yaşandığı havzalarda bu model, aşırı sulama, gereksiz su kullanımının artması ve tarla yüzeyinde su kayıplarının çoğalması gibi olumsuz sonuçlar doğurabilir. Ayrıca farklı su ihtiyaçlarına sahip ürün desenleri arasında adil bir ücretlendirme sağlamaz; örneğin çeltik veya mısır gibi yüksek su tüketen ürünlerle zeytin veya bağ gibi düşük su gereksinimli ürünler aynı hektar ücretiyle sulanmış sayılır. Bu durum hem ekonomik hem de çevresel açıdan rasyonel olmayan bir yapıya işaret eder. Kurak yıllarda su arzı azalsa bile ücret değişmediği için talep yönetimi güçleşir ve sulama birliklerinin mali sürdürülebilirliği tehdit altına girer.

Sonuç olarak, alan bazlı fiyatlandırma modeli idari sadelik ve düşük maliyet açısından avantajlı olsa da, su tasarrufu, adalet, talep yönetimi ve uzun vadeli sürdürülebilirlik açısından ciddi sınırlılıklar taşımaktadır. Modern su yönetimi literatürü, iklim değişikliğiyle artan su kıtlığı koşullarında bu modelin tek başına yeterli olmadığını; ölçüme dayalı, daha esnek ve su tasarrufu sağlayan fiyatlandırma yaklaşımlarının giderek daha fazla ön plana çıktığını göstermektedir.

Avantajları

Alan bazlı sulama suyu fiyatlandırması, uygulama kolaylığı ve düşük idari yük nedeniyle dünya genelinde en sık tercih edilen geleneksel yöntemlerden biridir. Bu modelde çiftçiler suladıkları hektar başına sabit bir ücret ödedikleri için suyun gerçek tüketim miktarının ölçülmesine gerek kalmaz. Sayaç, telemetri sistemi, dijital izleme altyapısı ve su tüketim ölçer gibi teknolojik araçlara ihtiyaç duyulmaması, hem başlangıç yatırım maliyetlerini hem de işletme ve bakım giderlerini önemli ölçüde azaltır. Sulama birliklerinin personel ihtiyacını azaltarak tahakkuk, kayıt, kontrol ve faturalama süreçlerini basitleştirir; böylece idari süreçler hızlanır ve bürokratik yük minimum seviyede tutulur. Özellikle kırsal bölgelerde teknik kapasitenin sınırlı, okuryazarlık seviyesinin düşük olduğu yerlerde uygulama kolaylığı sistemin en önemli avantajlarından biri haline gelir. Bu nedenlerle alan bazlı fiyatlandırma, sulama kurumları açısından en düşük işletme maliyetine sahip yöntem olarak kabul edilmektedir.

Teknolojik gereksinimin düşük olması, modelin diğer önemli avantajıdır. Su kullanımının ölçülmesini gerektirmediği için sulama kanallarında sayaç, debimetre, basınç düzenleyici ya da otomasyon sistemleri kurulmasına gerek yoktur. Bu durum özellikle gelişmekte olan ülkelerde altyapı yatırım maliyetlerinin yüksekliği dikkate alındığında önemli bir avantaj sağlar. Büyük, geniş ve dağınık tarım alanlarına sahip bölgelerde ölçüm cihazlarının kurulması ve bakımı hem maliyetli hem de operasyonel açıdan zor olduğundan, alan bazlı tarife bu tür coğrafi ve kurumsal koşullar için daha uygulanabilir bir çerçeve sunar. Geleneksel yüzey sulama ve özellikle yerçekimi ile çalışan sulama sistemlerinde teknik gereksinimin asgari olması, modelin pratik uygulanabilirliğini daha da artırmaktadır.

Alan bazlı fiyatlandırmanın sağladığı bir diğer avantaj ise yönetsel istikrar ve çiftçi açısından öngörülebilirlik oluşturmaktır. Fiyatın tüketim miktarına bağlı olarak değişmemesi, yıllık veya sezonluk sulama ücretlerinin sabit kalmasını sağlar. Bu durum çiftçiler için mali planlamayı kolaylaştırır; üreticiler sulama maliyetlerini önceden bilerek ürün seçimi, girdi kullanımı ve üretim stratejilerini daha güvenli bir şekilde planlayabilirler. Mevsimsel su arzındaki dalgalanmalar veya kuraklık gibi dönemsel faktörler fiyatlara doğrudan yansımadağı için mali istikrar korunur. Ayrıca maliyet-lisans ve tahsilat süreçlerinin basit olması sulama birliklerinin gelir akışını düzenli biçimde sürdürebilmesine imkân tanır. Türkiye, Hindistan ve Pakistan gibi geniş sulama alanlarına sahip ülkelerde bu modelin uzun yıllar tercih edilmesinin temel nedenlerinden biri de bu yönetsel öngörülebilirlik ve kurumsal istikrardır.

Türkiye ve Hindistan gibi çok geniş sulama alanlarına sahip ülkelerde bu nedenle tercih edilmektedir.

Dezavantajları

Alan bazlı sulama suyu fiyatlandırması, uygulama kolaylığına rağmen su yönetimi, kaynak verimliliği ve sürdürülebilirlik açısından önemli dezavantajlar içermektedir. Bu modelin en temel sorunu, su tüketimi ile ücret arasındaki bağın kopuk olmasıdır. Çiftçiler kullandıkları su miktarından bağımsız olarak sabit bir ücret ödedikleri için daha fazla su tüketmelerini engelleyen herhangi bir ekonomik sinyal bulunmaz. Su kullanımının artmasının maliyete yansımaması hem su tasarrufu davranışını zayıflatır hem de özellikle su kıtlığının yaşandığı havzalarda aşırı sulama eğilimini teşvik eder. Bu durum, tarla yüzeyinde su kayıplarının yükselmesine, drenaj yüklerinin artmasına, taban suyu seviyelerinin yükselmesine ve uzun vadede toprak tuzluluğu gibi ciddi çevresel sorunlara yol açabilir. Dolayısıyla bu fiyatlandırma modeli, suyun sürdürülebilir kullanımını sağlamada yetersiz kalmaktadır.

Bir diğer önemli dezavantaj, farklı ürün desenleri arasında adil bir maliyet paylaşımı sağlayamamasıdır. Sulama gereksinimleri birbirinden çok farklı olan ürünler (örneğin çeltik ya da mısır ile zeytin ya da bağ gibi) alan bazlı sistemde aynı ücreti öder. Yüksek su tüketen ürünlerle düşük su tüketen ürünlerin aynı maliyetle sulanması, hem çapraz sübvansiyona neden olur hem de aşırı su tüketen ürünlerin ekonomik olarak teşvik edilmesine yol açar. Bu durum hem kaynak kullanımı açısından verimsizdir hem de düşük su tüketimli ürün üreten çiftçiler için adaletsiz bir mali yük yaratır. Özellikle ürün çeşitliliğinin yüksek olduğu bölgelerde bu adaletsizlik daha görünür hale gelir.

Alan bazlı fiyatlandırmanın başka bir sınırlılığı da kuraklık dönemlerinde etkin talep yönetimini engellemesidir. Su arzının azaldığı yıllarda fiyat sabit kaldığı için talep üzerinde herhangi bir baskı oluşmaz; çiftçiler aynı maliyetle su kullanmaya devam etmek ister. Bu nedenle sulama birlikleri su kısıntısı uygulamak zorunda kalabilir ve arz kısıtlamaları fiyat yerine idari müdahaleler yoluyla yapılır. Bu durum hem çatışma riskini artırır hem de su yönetiminde esneklik sağlamaz. Kurumsal kapasitesi sınırlı bölgelerde sulama tahsislerinin yönetimi daha zor hale gelir.

Ekonomik açıdan değerlendirildiğinde alan bazlı tarife, maliyet geri kazanımı konusunda da ciddi kısıtlar içerir. Ücretler genellikle düşük tutulduğu için sulama altyapısının işletme, bakım ve onarım maliyetleri yeterince karşılanamaz. Bu durum uzun vadede altyapının yıpranmasına, bakım eksikliklerine ve sistemin sürdürülebilirliğinin zayıflamasına neden olur. Dünya Bankası ve OECD raporları, alan bazlı fiyatlandırmanın uygulandığı birçok ülkede maliyet geri kazanım oranının %20'nin altında kaldığını, bunun da kamuya ek finansman yükü oluşturduğunu göstermektedir.

Son olarak, alan bazlı tarifelerin su ölçüm altyapısının gelişmesini de engellediği belirtilmektedir. Çünkü ölçüme dayalı sistemlere geçiş için gerekli teknik, finansal ve kurumsal teşvikler oluşmaz; bu da modern sulama

teknolojilerinin (damla, yağmurlama, otomasyon, uzaktan izleme vb.) yaygınlaştırılmasını zorlaştırır. Uzun vadede bu durum bölgesel su verimliliğinin artmasını engeller.

2.2 Kademeli tarifeler

Kademeli tarifeler, sulama suyu fiyatlarının tüketim arttıkça kademeli biçimde yükseldiği bir fiyatlandırma modelidir ve su talebinin ekonomik yollarla yönetilmesi açısından literatürde en etkili yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir. Bu sistemde kullanıcılar belirli bir temel su miktarını düşük fiyattan temin ederken, daha yüksek tüketim seviyelerine geçtikçe birim su fiyatı artar. Böylece düşük gelirli veya küçük ölçekli çiftçiler korunurken, yüksek su tüketen büyük işletmeler için maliyet artışı yoluyla güçlü bir tasarruf teşviki yaratılır. Özellikle su kıtlığının giderek arttığı bölgelerde kademeli tarifeler, hem tarımsal su israfının azaltılması hem de sulama altyapısının sürdürülebilir finansmanı açısından önemli bir politika aracı haline gelmiştir.

Bu modelin en önemli avantajı, kullanıcı davranışları üzerinde güçlü bir yönlendirici etki yaratmasıdır. Su tüketiminin artmasıyla birlikte birim maliyet de arttığından, çiftçiler gereksiz sulamadan kaçınma eğilimi gösterir ve daha verimli sulama tekniklerine (damla, yağmurlama, basınçlı sistemler) geçmek için ekonomik motivasyon oluşur. Meksika, Şili ve ABD'nin birçok batı eyaletinde yapılan uygulamalar, kademeli tarifelerin su tüketimini %10 ile %30 arasında azaltabildiğini göstermektedir (OECD, 2020; World Bank, 2017). Bu yönüyle sistem, hem su koruma politikalarını destekler hem de iklim değişikliği koşullarında artan su kıtlığına uyumu güçlendirir.

Kademeli tarifeler aynı zamanda sosyal açıdan da görece adil bir yapı sunar. İlk kullanım bloğunda düşük tarife uygulandığı için küçük üreticiler ve sınırlı sulama yapan işletmeler ekonomik olarak korunur. Buna karşın suyu yoğun şekilde tüketen büyük ölçekli tarım işletmeleri daha yüksek birim maliyet öder, böylece maliyet geri kazanım oranı yükselirken sosyal eşitlik de korunmuş olur. Bu yapı, özellikle Meksika ve ABD'nin Kaliforniya, Colorado gibi bölgelerinde su kullanıcı birliklerinin mali istikrarını artırmıştır. Ayrıca tarife kademeleri esnek bir biçimde düzenlenebildiğinden, kuraklık dönemlerinde üst blok ücretleri artırılarak talep yönetimi hızlı ve etkin şekilde sağlanabilir.

Bununla birlikte kademeli tarifelerin bazı sınırlılıkları vardır. Öncelikle tüketim miktarının doğru şekilde ölçülmesini gerektirdiği için sayaç, izleme altyapısı, bakım ve denetim maliyetleri artar. Bu durum özellikle düşük gelirli veya geniş yüzey sulama sistemlerinin yaygın olduğu bölgelerde başlangıç yatırım maliyetlerini artırabilir. Ayrıca ürün deseninin çok heterojen olduğu alanlarda kademeler arasında adil bir dağılım yapmak zordur; örneğin çeltik gibi yüksek su tüketimli ürünlerin yetiştirildiği alanlarda temel blok tüketimin düşük belirlenmesi çiftçiler açısından maliyet baskısı yaratabilir. Bazı ülkelerde (örneğin Hindistan ve Mısır) su tüketiminin doğru ölçülebilmesi nedeniyle

kademeli tarifeler uygulanamamış veya beklenen sonuçları vermemiştir (FAO, 2020).

Sonuç olarak kademeli tarifeler, su tasarrufunu teşvik etme, talep yönetimi sağlama, küçük çiftçileri koruma ve maliyet geri kazanımını artırma açısından volumetrik sisteme yakın derecede etkili ve sosyal açıdan dengeli bir modeldir. Ancak etkin şekilde uygulanabilmesi için ölçüm altyapısı, güçlü kurumsal yapı, şeffaf faturalama ve çiftçi farkındalığı gerekmektedir. Bu nedenle birçok ülkede kademeli sistem, bazen volumetrik fiyatlandırma ile birlikte hibrit bir model olarak kullanılmakta; hem suyun miktarı hem de tüketim kademesi birlikte dikkate alınarak daha güçlü bir yönetim çerçevesi oluşturulmaktadır.

- Avantajları: Su kullanımını azaltmaya yönelik güçlü bir ekonomik teşvik yaratır. İlk kademede düşük fiyat uygulanarak küçük çiftçiler korunabilir.
- Dezavantajları: Sulama birliklerinde etkin ölçüm ve denetim altyapısı gerektirir. Çok çeşitli ürün deseni olan bölgelerde adil fiyatlandırma tartışmalı olabilir.
- Ülke örnekleri: Meksika ve Şili’de ulusal sulama politikalarında kademeli tarifeler bulunmakta; ABD’nin Colorado ve Idaho havzalarında su kullanıcı birlikleri bu modeli yaygın biçimde uygulamaktadır (FAO AQUASTAT, 2021).

2.3 Volumetrik (hacimsel) fiyatlandırma

Volumetrik veya hacimsel sulama suyu fiyatlandırması, suyun gerçek tüketilen miktarı üzerinden ücretlendirildiği modern bir su yönetim yaklaşımıdır ve günümüzde su kıtlığıyla mücadelede en etkili modellerden biri olarak kabul edilmektedir. Bu sistemde üreticinin kullandığı su miktarı sayaç, debimetre veya dijital izleme cihazları ile ölçülür ve birim metreküp (m³) üzerinden fiyatlandırılır. Volumetrik sistemin temel gücü, tüketim ve maliyet arasında doğrudan bir ilişki kurmasıdır. Çiftçi ne kadar su kullanırsa o kadar ödeme yapar; bu da su tasarrufunu teşvik eden güçlü bir ekonomik sinyal oluşturur. İklim değişikliği ve artan su kıtlığı koşullarında birçok ülkenin bu modeli tercih etmesinin nedeni, hem talebi yönetmede hem de suyun verimli kullanımını sağlamada yüksek etkililiğe sahip olmasıdır.

Bu fiyatlandırma modelinin en önemli avantajı, su kullanım davranışını doğrudan yönlendirmesidir. Fazla su kullanımının maliyeti artırması, tarımsal işletmeleri gereksiz sulamadan kaçınmaya ve daha verimli sulama teknolojilerine yönelmeye teşvik eder. Avrupa Birliği ülkelerinde yapılan uygulama değerlendirmelerine göre volumetrik tarife sistemine geçiş, su tüketiminde %15 ile %35 arasında düşüş sağlayabilmektedir (European Commission, 2019). Bu sonuç, volumetrik sistemin hem su kaynaklarının korunması hem de sürdürülebilir tarımsal üretimin desteklenmesi açısından güçlü bir politika aracı

olduğunu göstermektedir. Fransa, İspanya ve İtalya gibi modern sulama altyapısına sahip ülkelerde volumetrik fiyatlandırma, sulama birliklerinin maliyet geri kazanım oranlarını artırmış; bakım ve yenileme yatırımlarının finansmanını kolaylaştırmıştır.

Volumetrik tarifeler aynı zamanda daha adil bir maliyet paylaşım yapısı sunar. Çünkü suyu yoğun tüketen ürün desenine sahip işletmeler daha fazla ödeme yaparken, su ihtiyacı düşük olan ürünler yetiştiren veya daha verimli sulama yapan çiftçiler daha az ödeme yapar. Bu durum, suyun gerçek maliyetinin kullanıcıya yansımaları sağlar ve ekonomik açıdan daha rasyonel bir sistem oluşturur. Ürün deseninin çeşitliliği yüksek olan bölgelerde, bu model hakkaniyete dayalı bir fiyatlandırma mekanizması sunduğu için giderek daha fazla benimsenmektedir.

Bununla birlikte volumetrik tarifelerin uygulanması bazı zorluklar içerir. Öncelikle suyun ölçülmesi için altyapı gerektirir; sayaçların kurulumu, bakımı, kalibrasyonu ve denetimi ciddi bir maliyet oluşturur. Geniş alana yayılmış açık kanal sistemlerinde suyun bireysel tarlalara dağıtımını hassas bir şekilde ölçmek zor olabilir. Bu nedenle gelişmekte olan ülkelerde volumetrik sistemin yaygınlaşması çoğu zaman altyapı yatırımları ile eş zamanlı olarak ilerler. Ayrıca ölçümün hassas yapılmaması durumunda sistemin güvenilirliği zedelenabilir ve çiftçi kabulü azalabilir. Bazı bölgelerde (örneğin Mısır, Pakistan) teknik kapasite eksikliği ve kayıp-kaçak oranlarının yüksek olması volumetrik sistemin etkin uygulanmasını zorlaştırmaktadır (FAO, 2020).

Yine de pek çok ülke, kademeli tarifelerle birlikte hibrit volumetrik modeller geliştirmiştir. Burada temel su miktarı düşük bir fiyattan verilirken, üst tüketim blokları volumetrik biçimde fiyatlandırılır. Bu sistem hem ölçümü kolaylaştırır hem de sosyal adalet ve mali sürdürülebilirlik arasında güçlü bir denge kurar. Avrupa Birliği'nin Water Framework Directive (WFD) kapsamında maliyet geri kazanımının zorunlu hale getirilmesi, İspanya ve İtalya gibi ülkelerde volumetrik fiyatlandırmayı temel model haline getirmiştir. ABD'nin birçok batı eyaletinde (özellikle California Central Valley, Colorado River Basin) ise volumetrik fiyatlandırma, su tahsis kotaları ve su piyasası araçlarıyla birlikte uygulanmaktadır.

Sonuç olarak volumetrik sulama suyu fiyatlandırması, su kaynaklarının ekonomik, çevresel ve sosyal açıdan sürdürülebilir yönetimini destekleyen en güçlü araçlardan biridir. Tüketimi doğrudan ölçmesi ve kullanıcıya gerçek maliyet sinyali vermesi nedeniyle hem su tasarrufunu teşvik eder hem de sulama altyapısının uzun vadeli finansal sürdürülebilirliğini güçlendirir. Altyapı gereksinimleri ve uygulama maliyetleri yüksek olsa da modern su yönetimi anlayışında birçok ülke için tercih edilen bir politik araç olmaya devam etmektedir.

Uluslararası literatür, su tasarrufu ve sürdürülebilirlik açısından en etkin modelin volumetrik fiyatlandırma olduğunu belirtmektedir (OECD, 2020).

- Avantajları: Su kullanımını birebir ölçerek en hassas ve çevreci yönetim imkânı sağlar. Kıtık dönemlerinde talep yönetimini kolaylaştırır.
- Dezavantajları: Yüksek yatırım maliyeti gerektirir (sayaçlar, şebeke yenileme, izleme altyapısı). Tarımda heterojen tüketimi olan bölgelerde çeşitli uyarlamalar gerekebilir.

2.4. Bölgesel Uygulamalar

Avrupa Birliği

Avrupa Birliği'nin su politikaları, 2000/60/EC sayılı Su Çerçeve Direktifi (Water Framework Directive–WFD) ile kapsamlı bir çerçeveye kavuşturulmuş ve su hizmetlerinde “maliyet geri kazanımı” ilkesi üye ülkeler için zorunlu hale getirilmiştir. Bu ilke doğrultusunda AB ülkeleri, sadece suyun ekonomik maliyetini değil, aynı zamanda çevresel ve kaynak maliyetlerini de fiyatlandırma mekanizmalarına yansıtmakla yükümlüdür. WFD, tarımsal sulama dahil tüm su hizmetlerinde sürdürülebilirliği sağlamak amacıyla suyun gerçek maliyetinin kullanıcıya iletilmesini ve kirleten-öder prensibinin uygulanmasını esas alır. Bu yükümlülük, AB’de fiyatlandırma politikalarının giderek daha ölçüme dayalı ve verimlilik odaklı bir yapıya dönüşmesine yol açmıştır.

Bu çerçevede İspanya, sulama sektöründe en ileri uygulamalara sahip ülkelerden biridir. Ülkede sulamanın yaklaşık %85’i volumetrik ölçüm ile yapılmakta olup, özellikle modern basınçlı sulama sistemlerinde sayaç kullanımı standart hale gelmiştir. AB Kırsal Kalkınma Programları kapsamında sağlanan fonlar sayesinde birçok bölgede sulama altyapısı modernize edilmiş ve blok bazında ölçüm, telemetri sistemleri ve uzaktan izleme teknolojileri yaygınlaştırılmıştır. Bu dönüşüm, hem su tasarrufunu artırmış hem de sulama birliklerinin mali sürdürülebilirliğini güçlendirmiştir.

İtalya’da ise Po Ovası örneği, AB içinde dikkat çeken bir diğer uygulamayı temsil eder. Bölgede su fiyatlandırması yalnızca tüketilen su miktarına göre değil, aynı zamanda suyu iletmek için kullanılan enerjinin maliyetine göre belirlenir. Bu nedenle “enerji + su” bileşik tarife modeli uygulanmaktadır. Bu yaklaşım, basınçlı sulama sistemlerinin yaygın olduğu bölgelerde maliyetlerin daha gerçekçi biçimde yansıtılmasını sağlar. Ayrıca su kullanıcı birlikleri, bölgesel ölçekte oldukça özerk ve kurumsal kapasitesi yüksek yapılardır; bu da fiyatlandırma politikalarının kararlılıkla uygulanmasına olanak tanır.

Hollanda ise tam maliyet geri kazanımının en başarılı örneklerinden biri olarak öne çıkar. Ülkede su yönetimi büyük ölçüde “waterschappen” adı verilen özerk su kurulları tarafından yürütülmektedir. Bu kurullar hem drenaj hem

sulama hem de taşkın kontrol hizmetlerini yönetir ve maliyetlerin neredeyse tamamını kullanıcıya yansıtır. Böylece hem altyapı yatırımlarının finansmanı sağlanır hem de suyun verimli kullanılmasına yönelik güçlü ekonomik teşvik oluşturulur. Hollanda'nın yüksek kurumsal kapasitesi ve katılımcı yönetim yapısı, maliyet geri kazanımının sürdürülebilir biçimde uygulanabilmesine olanak tanımaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, Avrupa Birliği'nde modern sulama altyapısına sahip bölgelerde tüketim başına fiyatlandırma ve volumetrik ölçüm standart hale gelmiştir. WFD'nin zorunlu tuttuğu maliyet geri kazanımı ilkesi, AB ülkelerini daha ölçülebilir, adil, sürdürülebilir ve verimlilik odaklı bir sulama suyu yönetim modeline yönlendirmiştir.

ABD Amerika Birleşik Devletleri'nde su yönetimi, ulusal düzeyde merkezi bir yapıdan ziyade eyalet ve havza ölçeğinde yürütülen bir yönetim modeline dayanır. Bu nedenle sulama suyu fiyatlandırması, su arzının durumu, sulama altyapısının niteliği ve yerel kurumsal kapasiteye bağlı olarak bölgeden bölgeye önemli ölçüde değişiklik gösterir (OECD, 2020). Su kıtlığının kronik bir sorun hâline geldiği batı eyaletlerinde hem tahsis hem de fiyatlandırma mekanizmaları daha katı düzenlemelere tabi tutulmuştur.

Bu yaklaşımın en bilinen örneklerinden biri California'daki Central Valley Project (CVP) uygulamalarıdır. CVP kapsamında üreticilere yıllık su tahsis kotası verilir; çiftçi kendisine tahsis edilen miktarı aştığında birim fiyat katlanarak artar. Böylece hem su tüketimi üzerinde güçlü bir talep yönetimi sağlanır hem de aşırı tüketim ekonomik olarak caydırılır (U.S. Bureau of Reclamation, 2019; California Department of Water Resources, 2020).

ABD'nin batı eyaletlerinde sulama hizmetlerinin önemli bir bölümü, yerel ölçekte güçlü yönetime sahip su kullanıcı birlikleri (irrigation districts) tarafından yürütülür. Bu birlikler sulama altyapısının işletme, bakım ve yenileme maliyetlerini karşılayabilmek için tarifeleri düzenli olarak günceller ve bu sayede maliyet geri kazanımını sağlayan sürdürülebilir bir finansal yapı oluşturur (USDA, 2018). Ayrıca kullanıcıların karar süreçlerine doğrudan katılımı birlik yönetimlerinin demokratik bir yapıda işlemesini sağlar; bu da fiyatlandırma politikalarının yerel düzeyde kabul edilmesini kolaylaştırır.

Colorado Nehri Havzası gibi su arzının son derece sınırlı olduğu bölgelerde ise kademeli tarifeler yoğun biçimde uygulanmaktadır. Bu bölgelerde tüketim arttıkça birim fiyatın yükselmesi, su kıtlığı koşullarında aşırı kullanımın önlenmesi adına güçlü bir ekonomik sinyal oluşturur (Colorado River Basin Water Board, 2021). Uzun süreli kuraklık ve iklim değişikliğinin etkileri nedeniyle batı ABD, tüketim bazlı fiyatlandırma mekanizmalarının en erken geliştiği bölgelerden biri olmuştur.

ABD’de volumetrik fiyatlandırmanın yaygınlaşmasını kolaylaştıran en önemli nedenlerden biri, ölçüm altyapısının gelişmiş olmasıdır. Tarlalara su girişinde sayaç ve debimetre kullanımı, birçok eyalette onlarca yıldır standart uygulamadır. Bu altyapıya ek olarak özel sektörün otomasyon sistemleri, telemetri teknolojileri ve sensör tabanlı ölçüm araçları geliştirmedeki güçlü yatırımları, volumetrik tarifelerin güvenilir şekilde uygulanmasını mümkün kılmaktadır (OECD, 2020; FAO, 2020). Böylece ABD’de suyun gerçek tüketim miktarına dayalı fiyatlandırma hem teknik olarak uygulanabilir hem de kurumsal açıdan sürdürülebilir bir yapı kazanmıştır.

3. DEVLET SU İŞLERİNİN KURUMSAL ROLÜ

Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ), Türkiye’de su kaynaklarının geliştirilmesi, planlanması, tahsisi ve yönetiminden sorumlu ana kamu kurumudur. 6200 sayılı Kuruluş Kanunu kapsamında DSİ; sulama, içme suyu temini, taşkın kontrolü ve hidroelektrik enerji üretimi gibi temel hizmetlerin yürütülmesinden sorumludur (Resmî Gazete, 1953). Kurumun sulama alanındaki temel rolü, büyük ölçekli sulama altyapılarının (barajlar, göletler, ana iletim kanalları, dağıtım şebekeleri) planlanması, projelendirilmesi ve işletmeye alınmasıdır. Türkiye’de modern sulama sistemlerinin büyük bölümü DSİ tarafından geliştirilmiş olup, kurum uzun yıllardır ulusal su politikalarının şekillendirilmesinde belirleyici bir konuma sahiptir.

DSİ’ nin sulama suyu yönetimindeki önemli görevlerinden biri su tahsisidir. Ülke su potansiyelinin illere, havzalara ve sulama şebekelerine dağıtılmasında DSİ’nin hazırladığı planlama çalışmaları ve hidrolojik analizler esas alınır. Bu kapsamda DSİ, yıllık su tahsis kararlarını meteorolojik veriler, baraj doluluk oranları ve havza ölçeğinde su dengesi analizlerine göre düzenler (DSİ, 2023). Kuraklık dönemlerinde tahsis kısıtlamaları, ürün deseninin belirlenmesi ve sulama programlarının planlanması da DSİ’ nin teknik rehberliği ile gerçekleştirilir.

DSİ’ nin diğer kritik işlevi sulama altyapısının işletme, bakım ve onarımıdır. 2011 yılından itibaren sulama birliklerine devredilen işletme alanları olsa da ana iletim sistemlerinin önemli bir bölümü hâlâ DSİ sorumluluğunda bulunmaktadır. Kurum, sulama projelerinin verimli şekilde çalışabilmesi için hidrolik yapıların kontrolü, kanalların temizliği, ölçüm yapılarının işlevselliği ve bakım-onarım faaliyetlerini düzenli olarak yürütmektedir (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2022).

Ayrıca DSİ, Türkiye’de su fiyatlandırma politikalarının belirlenmesinde dolaylı fakat kritik bir rol üstlenmektedir. Su ücretleri DSİ’ nin işletme ve bakım maliyetlerini, enerji giderlerini, amortisman ihtiyaçlarını ve yıllık bütçe yükümlülüklerini dikkate alarak belirlediği hesaplama yöntemlerine dayanır. Türkiye’ nin uzun yıllar alan (hektar) bazlı sulama suyu fiyatlandırması uygulamasının kurumsal arka planı da DSİ’nin bu maliyet yapısına dayanmaktadır (OECD, 2020). Son yıllarda modern basınçlı sulama

yatırımlarının artması ile birlikte DSİ, daha fazla ölçüme dayalı sistemlerin geliştirilmesini ve su verimliliğinin artırılmasını teşvik eden altyapı projelerine yönelmektedir.

Kurumun ulusal su politikasındaki rolü yalnızca altyapı ile sınırlı değildir. DSİ, havza yönetim planlarının hazırlanması, iklim değişikliği uyum stratejilerinin geliştirilmesi, taşkın risk yönetimi ve veri paylaşım mekanizmalarının kurulması gibi stratejik görevleri de yürütmektedir. Türkiye'nin tüm akarsu havzaları için uzun dönemli su potansiyeli hesaplamaları, akım gözlem istasyonları verileri ve hidrolojik projeksiyonları DSİ tarafından sağlanmakta; bu veriler hem ulusal planlama hem de uluslararası raporlama süreçlerinde temel referans olarak kullanılmaktadır (DSİ, 2023).

Sonuç olarak DSİ, Türkiye'nin su kaynaklarının sürdürülebilir yönetiminde merkezi bir role sahiptir. Kurum hem fiziksel altyapının oluşturulmasından hem de su tahsisi, veri yönetimi, taşkın güvenliği ve su verimliliği politikalarının uygulanmasından sorumlu olup, ulusal ölçekte su yönetiminin teknik ve idari omurgasını oluşturmaktadır.

4. TÜRKİYE'DE SULAMA SUYU FİYATLANDIRMA YÖNTEMLERİ

Türkiye'de sulama suyu fiyatlandırması üç modele dayanır:

1. Alan (hektar) esaslı
2. Bitki–girdi katsayılarıyla karma yöntem
3. Volumetrik fiyatlandırma (pilot) → GAP ve Konya Ovası'nda

Türkiye'de tarımsal sulama suyu fiyatlandırma sistemi, uzun yıllar boyunca Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'nün (DSİ) kurumsal yaklaşımı doğrultusunda şekillenmiş ve büyük ölçüde alan (hektar) bazlı fiyatlandırma modeli üzerine kurulmuştur. Bu modelde çiftçiler, tüketilen su miktarından bağımsız olarak sulanan alan başına ücret öder; böylece hem idari süreçlerin basitliği hem de ölçüm altyapısının sınırlı olduğu bölgelerde uygulanabilirliği nedeniyle ülke genelinde temel fiyatlandırma yöntemi olarak uzun süre varlığını sürdürmüştür. Alan bazlı tarifenin tercih edilmesinde iki temel faktör öne çıkar: (i) standart sayaç ve izleme sistemlerinin ülke genelinde henüz tam olarak yaygınlaşmaması, (ii) sulama birliklerinin ve kooperatiflerin yönetim kapasitelerine uygun, kolay uygulanabilir bir sistem ihtiyacı.

Bununla birlikte, Türkiye'de su kaynakları üzerindeki baskının artması, iklim değişikliğine bağlı kuraklık riskinin yoğunlaşması ve modern sulama altyapısının gelişmesiyle birlikte hacimsel (volumetrik) fiyatlandırmaya geçiş eğilimi giderek güçlenmektedir. Özellikle basınçlı sulama sistemlerinin yaygınlaştığı bölgelerde, suyun gerçek tüketim miktarına göre ölçüldüğü volumetrik model hem su tasarrufu sağlamak hem de işletme-bakım maliyetlerinin daha adil paylaşımını mümkün kılmaktadır. DSİ'nin son yıllarda geliştirdiği sulama projelerinde

(kapalı sistem basınçlı sulama, ana iletim hatlarında debimetre kullanımı, uzaktan izleme sistemleri vb.) hacimsel ölçüm altyapısının zorunlu hale gelmesi, bu dönüşümün kurumsal düzeyde de benimsendiğini göstermektedir.

Türkiye’de kullanılan bir diğer yöntem ise bileşik tarifeler olup, bazı bölgelerde alan bazlı ücretlendirme ile volumetrik ücretlendirme birlikte uygulanmaktadır. Bu sistemde çiftçiden sulanan alan için sabit bir ücret alınırken, belirli bir tüketim seviyesinin üzerindeki su kullanımı için metreküp bazlı ek ücret uygulanmaktadır. Bu hibrit yöntem, hem altyapısı henüz tamamen ölçüme uygun olmayan alanlarda adaletli bir geçiş modeli sunmakta hem de su tüketiminin aşırı artmasını engelleyen bir ara mekanizma işlevi görmektedir. Özellikle sulama birliklerinin kendi içinde farklı tüketim profillerine sahip üreticileri dengelemesi açısından bu modelin kullanımının arttığı görülmektedir.

Türkiye’de su fiyatlandırma politikalarının şekillenmesinde DSİ’ nin maliyet yapısı belirleyici bir unsurdur. Su ücretleri; işletme-bakım giderleri, enerji maliyetleri, işçilik, amortisman ve tahsis mekanizmalarının gerektirdiği kurumsal harcamalara göre belirlenir. Bu nedenle enerji maliyetlerinin yüksek olduğu pompaj sulama alanlarında fiyatlar daha yüksek, cazibeli sulama alanlarında daha düşük seviyelerdedir. DSİ’ nin yıllık fiyat tarifeleri tarımsal ürün gelirleri, bölgesel ekonomik koşullar ve sulama birliklerinin ödeme kapasitesi dikkate alınarak güncellenmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde Türkiye, hâlen alan bazlı fiyatlandırmanın yaygın olduğu bir yapıdan daha modern ve verimlilik odaklı hacimsel fiyatlandırma modeline geçiş sürecini yaşamaktadır. Bu dönüşüm, hem su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimini sağlamak hem de sulama altyapısının finansal sürdürülebilirliğini güçlendirmek açısından stratejik öneme sahiptir. İklim değişikliği, su talebinin artması ve havza bazlı su dengesindeki bozulmalar, Türkiye’de fiyatlandırma politikalarının giderek daha fazla ölçüme dayalı, verimlilik odaklı ve kademeli yapılara yönelmesine neden olmaktadır.

5. TÜRKİYE’DE BÖLGESEL UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Türkiye’de sulama suyu fiyatlandırma politikaları, ülkenin farklı coğrafi bölgelerinde su kaynaklarının niteliği, sulama altyapısının gelişmişliği, sulama birliklerinin kurumsal kapasitesi ve enerji maliyetleri gibi faktörlere bağlı olarak önemli ölçüde farklılık göstermektedir (DSİ, 2023; Tarım ve Orman Bakanlığı, 2022). Bu nedenle bölgesel uygulama örnekleri, Türkiye’nin su yönetiminde tek tip bir model yerine çoklu ve bölgeye özgü fiyatlandırma yöntemlerinin birlikte uygulandığını ortaya koymaktadır.

Güneydoğu Anadolu Bölgesi’nde (GAP), Fırat ve Dicle havzalarında yürütülen büyük ölçekli cazibeli sulama projelerinde uzun yıllar boyunca alan bazlı tarifeler temel fiyatlandırma yöntemi olmuştur. Bölgedeki sulama suyunun ağırlıklı olarak cazibeyle iletilmesi, enerji maliyetlerinin düşük olması ve geniş

alandaki ölçüm altyapısının yetersizliği alan bazlı fiyatlandırmayı destekleyen başlıca unsurlardır (DSİ, 2023). Ancak Şanlıurfa-Harran Ovası gibi modern basınçlı sulama sistemlerinin yoğunlaştığı bölgelerde, DSİ ve sulama birlikleri giderek daha fazla hacimsel ölçüm altyapısı uygulamaya başlamıştır. Su kıtlığı baskısının artması ve pamuk ile mısır gibi yüksek su tüketimli ürün desenlerinin yönetim gereklilikleri, tüketim esaslı fiyatlandırmanın önemini artırmaktadır (OECD, 2020).

Akdeniz Bölgesi'nde, özellikle Adana, Mersin ve Antalya'da hem pompajlı hem cazibeli sulama alanlarının bir arada bulunması fiyatlandırma yapısını çeşitlendirmektedir. Pompajlı sulama alanlarında enerji maliyetlerinin yüksekliği sebebiyle birim sulama ücretleri ülke ortalamasının üstünde seyretmektedir (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2022). Bölgedeki birçok sulama birliği bileşik tarifeler (alan + hacimsel) uygulamakta; çiftçiden sulanan alan için sabit bir ücret alınırken belirli bir tüketim eşliğinin üzerindeki kullanım metre-küp bazında fiyatlandırılmaktadır. Bu uygulama, ölçüm altyapısının tam olarak oturmadığı alanlarda adaleti sağlarken, aşırı su kullanımını da sınırlamaktadır (DSİ, 2023).

Ege Bölgesi, Türkiye'de hacimsel fiyatlandırmaya en yakın uygulamaların bulunduğu bölge olarak öne çıkar. Büyük Menderes ve Gediz havzalarında modern sulama sistemlerinin yaygınlaşmasıyla birlikte sayaç ve debimetre kullanımının arttığı görülmektedir. İzmir, Manisa ve Aydın'da bazı sulama kooperatifleri suyu doğrudan ölçerek gerçek tüketim esaslı fiyatlandırma yapmaktadır. Bu eğilimin temel nedeni, bölgedeki ürün deseninin (sebze, meyve, bağ ve zeytin) su tüketimi açısından oldukça heterojen olmasıdır. Bu çeşitlilik, alan bazlı tarifenin adaletsizlik yaratması nedeniyle ölçüme dayalı sistemleri zorunlu kılmaktadır (FAO, 2020).

İç Anadolu Bölgesi'nde, özellikle Konya Havzası'nda artan kuraklık baskısı ve yeraltı suyu seviyelerindeki düşüş, fiyatlandırma politikalarının yeniden değerlendirilmesini gerektirmiştir. Bölgede yeraltı suyuna dayalı sulama hâlen yaygın olsa da suyun aşırı tüketilmesi ve obruk oluşumları gibi çevresel riskler nedeniyle kademeli ve hacimsel tarifelerin uygulanması yönünde çalışmalar yapılmaktadır (OECD, 2020; Tarım ve Orman Bakanlığı, 2022). DSİ, bu bölgede modern basınçlı sulama yatırımlarını artırarak yeraltı suyu kullanımını azaltmayı ve yüzey suyuna dayalı ölçülebilir sistemleri yaygınlaştırmayı hedeflemektedir.

Marmara Bölgesi'nde ise özellikle Bursa, Balıkesir ve Tekirdağ çevresinde sulama altyapısının daha modern olması ve ürün deseninin katma değerli olması hacimsel fiyatlandırmanın uygulanabilirliğini artırmaktadır. Bölgede su kaynakları üzerinde artan baskı, kuraklık dönemlerinde tahsis kısıtlamaları ve su tüketiminin sıkı denetimini gerekli kılmaktadır. Bu nedenle birçok sulama birliği sayaç ve otomasyon sistemlerini devreye almak için yatırım planlarını hızlandırmıştır (DSİ, 2023).

Genel olarak bu örnekler, Türkiye’de tarımsal sulama suyu fiyatlandırmasının coğrafi, hidrolojik ve kurumsal koşullara bağlı olarak önemli farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır. Ülke genelinde alan bazlı fiyatlandırma hâlen yaygın olmakla birlikte, modern sulama altyapısının yaygınlaştığı bölgelerde volumetrik ve kademeli fiyatlandırma modellerine geçiş hızlanmakta, böylece hem su tasarrufu hem de maliyet geri kazanımı açısından daha sürdürülebilir bir yönetim çerçevesi hedeflenmektedir (OECD, 2020; FAO, 2020).

6. TARIMSAL SULAMA TARİFELERİ

Türkiye’de sulama birlikleri tarafından işletilen sulama tesislerinde uygulanan “su kullanım hizmet bedeli” ve “işletme-bakım” ücret tarifeleri, her yıl resmi olarak belirlenmektedir. Örneğin, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ) işbirliği ile hazırlanan 2024 yılı su kullanım hizmet bedeli tarifesi, sulama birliklerinin bütçe çalışmalarında esas alınacak asgari ücretler olarak yayınlanmıştır.

2025 yılı için de “2025 Yılında Sulama Birliklerince İşletilen Sulama Tesislerinde Asgari Değer Olarak Alınacak Su Kullanım Hizmet Bedeli Tarifeleri” resmi olarak açıklanmıştır.

2024 yılında yayınlanan verilerde, sulama tesisleri işletme-bakım ücret tarifeleri 30 farklı bitki çeşidi için dekar başına yaklaşık 43 TL ile 1858 TL arasında değişmektedir. 1000 m³ su ücretleri ise 43 TL ile 690 TL aralığında bildirilmiştir.

2025 yılı için yayınlanan tarifiede ise, dekar başına ücretlerin 81 TL ile 2 732 TL arasında belirlendiği, ayrıca 1000 m³ su bedelinin 129 TL ile 1 015 TL aralığında olacağı bildirilmiştir.

Tarifelerde ayrıca indirim uygulamaları da yer almakta; örneğin motopomp ile sulama yapan, yağmurlama/damla sistemleri kullanan üreticiler için indirim oranları tanımlanmıştır.

Ayrıca, birlik düzeyinde “ölçüm altyapısı” bulunan kapalı sistemlerde metre-küp bazında bedel uygulamaları da örneklenmiştir.

7. AB–OECD KARŞILAŞTIRMASI

AB ile OECD arasındaki en belirgin fark, regülasyon derinliği ve çevresel maliyet yaklaşımıdır. AB, Su Çerçeve Direktifi nedeniyle suyu ekonomik bir kaynak olarak yalnızca fiyatlandırma açısından değil, aynı zamanda çevresel etkiler açısından da değerlendirmekte, bu nedenle çoğu ülkede fiyatlar çevresel maliyetleri içermektedir. OECD ülkelerinde ise çevresel maliyetlerin fiyatlara yansıtılması daha sınırlı olup yalnızca Avustralya, Şili ve bazı ABD eyaletlerinde bu yaklaşım belirginleşmektedir.

Bir diğerk temel fark ölçüm altyapısıdır. AB’de tarımda kullanılan suyun önemli bölümü ölçülmekte iken OECD’de ölçüm düzeyi ülkelere göre ciddi farklılık göstermektedir. Avustralya’da neredeyse tüm su kullanımı ölçülürken ABD’de eyaletler arasında ölçüm zorunluluğı farklılık göstermekte, Asya-Pasifik bölgesindeki OECD üyelerinde ise ölçüm oranları daha düşüktür.

Sübvansiyon seviyesi de önemli bir ayırım oluşturmaktadır. AB, tarımsal sulamada kamu sübvansiyonlarını azaltma eğilimindeyken OECD ülkelerinin önemli bir kısmında sulama suyu fiyatları hâlâ yüksek oranda devlet desteklidir.

Türkiye’ nin AB ve OECD Yaklaşımları Açısından Konumu

Türkiye’ nin sulama suyu fiyatlandırması, AB ile OECD arasındaki bir geçiş modeline benzemektedir. DSİ ve sulama birlikleri hâlen geniş ölçüde alan bazlı tarife uygulamakta; ancak modern sulama yatırımlarının artmasıyla birlikte hacim bazlı fiyatlandırmaya geçiş hedeflenmektedir. Türkiye’de maliyet geri kazanım oranı %35–60 düzeylerinde olup bu oran AB ülkelerinin oldukça gerisindedir. Buna karşılık, suyun tarımsal kullanımında kamu sübvansiyonlarının yüksek kalması Türkiye’yi OECD’deki Japonya, Meksika ve Güney Kore gibi ülkelerle daha benzer bir konuma getirmektedir.

Türkiye’de ölçüm altyapısının sınırlı olması, modern sulama sistemlerinin yaygınlaşmaması ve su tahsis süreçlerinin ekonomik değil idari yöntemlerle yürütülmesi, AB standartlarına uyum sürecini yavaşlatmaktadır. 2023–2025 döneminde yayımlanan politika belgeleri ise hacim bazlı tarifeye geçiş, su verimliliğı yönetişiminin güçlendirilmesi ve AB Su Çerçeve Direktifi ile uyum sağlanması yönünde önemli adımlar içerir.

AB ve OECD ülkeleri arasında sulama suyu fiyatlandırması konusunda belirgin ayrımlar bulunmaktadır. AB daha düzenli, çevre odaklı ve ölçüme dayalı bir fiyatlandırma modeli uygularken OECD ülkeleri daha esnek ve heterojen bir yapı sergilemektedir. Avustralya ve İspanya gibi ülkeler modern ve verimli modellerin örneklerini oluştururken ABD hibrit bir fiyatlandırma yapısı sunmaktadır. Türkiye ise hem AB hem OECD modellerinden bazı özellikler taşıyan karma bir sistemden daha ölçüme dayalı bir modele doğru dönüşmektedir.

8- İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE SULAMA İLİŞKİSİ

İklim değışikliği, su kaynakları üzerinde artan baskılar oluşturmakta ve özellikle yarı kurak iklim kuşağında yer alan ülkelerde tarımsal üretimin sürdürülebilirliği açısından kritik riskler yaratmaktadır. Küresel sıcaklık artışı, evapotranspirasyonun yükselmesine, yağış rejiminde düzensizliklere ve kuraklık sıklığının artmasına neden olmakta; bu durum tarımsal sulama suyu talebinin giderek yükselmesine yol açmaktadır (IPCC, 2021). FAO (2022) verilerine göre dünya yüzeyindeki yenilenebilir su kaynaklarının %72’si tarımsal sulamada kullanılmakta olup, iklim değışikliği altında bu oranın artması beklenmektedir. Dolayısıyla sulama suyu yönetimi, yalnızca tarımsal verimliliğı değil, aynı

zamanda gıda güvenliği, kırsal kalkınma ve ekosistem bütünlüğünü doğrudan etkileyen stratejik bir alan hâline gelmiştir.

İklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkilerinin belirginleşmesi, tarım sektöründe verimli, adil ve sürdürülebilir bir sulama suyu fiyatlandırma politikası ihtiyacını ön plana çıkarmaktadır. Su kaynaklarının azalması ve kullanım maliyetlerinin yükselmesi, maliyetin kısmen veya tamamen kamu tarafından karşılandığı sistemlerin orta ve uzun vadede sürdürülebilirliğini azaltmaktadır. IPCC (2022) uyum raporu, su yönetimi politikalarında ekonomik araçların (pricing, water trading, demand management) güçlendirilmesinin iklim değişikliğine uyum için kritik olduğunu vurgulamaktadır.

Bu kapsamda sulama suyu fiyatlandırması, hem suyun ekonomik bir kaynak olarak etkin kullanımını sağlayan hem de iklim değişikliği karşısında tarımsal üretimi daha dayanıklı hâle getiren önemli bir uyum aracıdır. Fiyatlandırmanın etkin şekilde uygulanması, çiftçilerin su tasarrufu sağlayan modern sulama sistemlerine yönelmesini teşvik etmekte; bu durum hem su talebini azaltmakta hem de enerji maliyetlerinde tasarruf sağlamaktadır (OECD, 2010). FAO (2017), sulama suyunun gerçek maliyetinin yansıtıldığı sistemlerde çiftçilerin su tasarrufu davranışlarının belirgin biçimde güçlendiğini ve su verimliliği yatırımlarının arttığını belirtmektedir.

Avrupa Birliği su politikaları da fiyatlandırmayı iklim değişikliği bağlamında konumlandırmaktadır. Su Çerçeve Direktifi (2000/60/EC), maliyet geri kazanımı ve kirlenen-kullanan öder ilkelerini zorunlu tutarak suyun ekonomik değerini merkeze almaktadır. AB, iklim değişikliğinin yoğun hissedildiği Güney Avrupa ülkelerinde ölçüme dayalı tarife sistemlerini yaygınlaştırmış ve suyun gerçek maliyetinin çiftçilere yansıtılmasını iklim uyum stratejilerinin temel bileşeni hâline getirmiştir (EC, 2019). Bu yaklaşım, su kıtlığının arttığı havzalarda su tahsisinin daha verimli yapılmasını ve çiftçilerin yüksek su tüketen ürünlerden daha az su isteyen alternatif ürünlere yönelmesini kolaylaştırmaktadır.

OECD ülkelerinde yapılan çalışmalar da fiyatlandırmanın iklim değişikliğine uyumu desteklediğini göstermektedir. Örneğin Avustralya Murray–Darling Havzası’nda uygulanan ölçüme dayalı fiyatlandırma ve su hakkı ticareti, 2000’li yıllarda yaşanan “Millennium Drought” döneminde suyun talep yönlü yönetimini kolaylaştırmış ve tarım sektörünün kuraklıktan kaynaklı kayıplarını önemli ölçüde azaltmıştır (Grafton et al., 2013). ABD’nin Batı eyaletlerinde yapılan çok sayıda araştırma, hacim bazlı fiyatlandırmanın su tasarrufunu alan bazlı tarifelere kıyasla %15–35 oranında artırdığını ortaya koymaktadır (Dinar & Mody, 2015).

Türkiye özelinde iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkileri giderek belirginleşmekte; özellikle Akdeniz, Güneydoğu Anadolu ve İç Anadolu havzalarında hem yüzey sularında hem de yeraltı su seviyelerinde ciddi azalmalar görülmektedir (MGM, 2023; DSİ, 2024). Artan sulama suyu talebi ve düşen su arzı, mevcut tarımsal sulama altyapısının sürdürülebilirliğini tehdit etmekte ve

maliyet geri kazanım oranlarının düşük olması (yaklaşık %35–60) sektörün kırılganlığını artırmaktadır. Bu nedenle Türkiye’de su verimliliği stratejisi (2023) ve ilgili mevzuatlar, sulama suyunda ölçüme dayalı fiyatlandırmanın yaygınlaştırılmasını iklim değişikliğine uyum politikalarının temel unsuruna dönüştürmüştür.

Sonuç olarak, iklim değişikliğinin giderek şiddetlenen etkileri karşısında sulama suyu fiyatlandırması; su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi, gıda güvenliğinin korunması, tarım sektörünün iklim krizine karşı dayanıklılığının artırılması ve su verimliliği yatırımlarının teşvik edilmesi açısından hayati öneme sahiptir. Etkin bir fiyatlandırma modeli, hem suyun ekonomik değerini yansıtarak talep yönetimini güçlendirmekte hem de çiftçilerin iklim dostu, tasarruf sağlayan modern sulama tekniklerine yönelmesini sağlamaktadır. Bu nedenle iklim değişikliğine uyum stratejilerinin merkezinde su fiyatlandırmasının yer alması, gelecekte su kıtlığı riskinin yönetilmesi açısından kaçınılmaz bir politika gerekliliği hâline gelmiştir.

9. SONUÇ

Türkiye’ nin mevcut sulama suyu fiyatlandırma yapısı, uzun yıllar boyunca alan bazlı tarife sistemine dayanmış olup suyun gerçek kullanım miktarı ile ödeme arasında güçlü bir bağ kuramamıştır. Bu durum, özellikle su kıtlığının giderek arttığı bir coğrafyada, su tasarrufunu teşvik etmek açısından önemli bir zafiyet oluşturmaktadır. İklim değişikliğine bağlı olarak ortaya çıkan artan sıcaklıklar, azalan yağış miktarları ve tarımsal su talebindeki yükseliş; suyun ekonomik değerinin daha net ortaya konulmasını gerektirmektedir. Bu nedenle, Türkiye’ nin su yönetiminde sürdürülebilir bir fiyatlandırma modeline geçiş ihtiyacı her zamankinden daha belirgindir.

Sulama suyunun tüketilen hacim üzerinden fiyatlandırılmasını sağlayan sayaç zorunluluğu ve volumetrik tarifelerin yaygınlaştırılması, su tasarrufu ve adil maliyet paylaşımı açısından kritik önem taşımaktadır. Volumetrik sistem, suyun gerçek maliyetinin kullanıcıya yansıtılmasını sağlayarak hem su tüketimini azaltmakta hem de sulama altyapısının işletme ve bakım maliyetlerinin daha sağlıklı biçimde karşılanmasına katkıda bulunmaktadır. Türkiye’de modern sulama projelerinde ölçüm altyapısının adım adım kurulması, bu dönüşümün teknik temelini oluşturmaktadır; ancak uygulama kapsamının genişletilmesi ve kurumsal kapasitenin güçlendirilmesi gerekmektedir.

2023 yılında yürürlüğe giren Su Verimliliği Yasası, Türkiye’de suyun ekonomik ve çevresel değerinin yeniden tanımlanması açısından önemli bir politika adımıdır. Bununla birlikte, yasanın hedeflerinin sahada karşılık bulabilmesi için sulama birlikleri, DSİ, yerel yönetimler ve çiftçiler arasında koordinasyonun güçlendirilmesi; ölçüm, izleme ve denetim altyapısının yaygınlaştırılması gerekmektedir. Uygulama kapasitesinin artırılması, yasanın su tasarrufu hedeflerine ulaşması açısından belirleyici olacaktır.

Türkiye'nin su yönetimi yaklaşımı, Avrupa Birliği'nin "kullanan öder" ve "kirlüten öder" ilkeleri doğrultusunda gelişmelidir. AB'de su hizmetlerinde maliyet geri kazanımı zorunlu tutulmakta; çevresel ve ekonomik maliyetlerin fiyatlandırmaya yansıtılması suyun sürdürülebilir kullanımını desteklemektedir. Türkiye'nin AB uyum süreci kapsamında bu standartlara yaklaşması hem suyun gerçek değerinin kabul edilmesini sağlayacak hem de sulama altyapısının daha güçlü ve sürdürülebilir bir finansman modeline kavuşmasına katkıda bulunacaktır.

İklim değişikliği tarım sektöründe üretim maliyetlerini artırırken, su kıtlığının ekonomik etkileri de giderek artmaktadır. Bu nedenle suyun etkin, ölçülebilir ve ekonomik sinyallerle yönetilen bir sisteme kavuşması vazgeçilmez bir ihtiyaçtır. Türkiye'nin su fiyatlandırma politikasında sürdürülebilir, ölçüme dayalı, adil ve kaynak verimliliğini önceleyen bir yaklaşımı benimsemesi; hem su kaynaklarının korunması hem de tarımsal üretimin geleceği açısından kritik öneme sahiptir. Bu doğrultuda atılacak her adım, ülkenin su güvenliğini güçlendirecek ve iklim değişikliğinin yaratacağı ek maliyet baskısına karşı daha dayanıklı bir tarım sektörü oluşmasına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- California Department of Water Resources. (2020). Agricultural water use efficiency and water allocation report. Sacramento, CA.
- California Department of Water Resources. (2020). Water allocations and agricultural water pricing. Sacramento, CA.
- Colorado River Basin Water Board. (2021). Water allocation, drought management, and pricing structures in the Colorado River Basin. U.S. Government.
- Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ). (2023). Faaliyet Raporu 2022–2023. Tarım ve Orman Bakanlığı.
- DSİ. (2022). Faaliyet Raporu 2022. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü.
- DSİ. (2023). Türkiye’de Su Yönetimi Raporu. DSİ Yayınları.
- Ediger, V. Ş., et al. (2019). Türkiye toplumunun enerji tercihleri. *Energy Policy*, 133, 110899.
- European Commission. (2000). Water Framework Directive 2000/60/EC.
- European Commission. (2012). Assessment of cost recovery through water pricing. Directorate-General for Environment. Publications Office of the European Union.
- European Commission. (2019). Water in the EU — Key facts. Directorate-General for Environment.
- FAO. (2011). The State of the World’s Land and Water Resources for Food and Agriculture (SOLAW). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2020). AQUASTAT – Global information system on water and agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2020). Irrigation and water productivity — AQUASTAT database. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2021). AQUASTAT Main Database. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2022). The State of Food and Agriculture 2022: Leveraging automation in agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Karademir, N. (2017). Akkuyu Nükleer Güç Santrali halk görüşleri. *International Journal of Energy Economics*.
- Meksika CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2018). Agricultural water management and tariff structure report. Government of Mexico.
- OECD. (2010). OECD Environmental Performance Reviews: Water Resources Management. Organisation for Economic Co-operation and Development.

- OECD. (2020). Pricing Water Resources and Water and Sanitation Services. OECD Studies on Water. <https://doi.org/10.1787/6893cdac-en>
- OECD. (2020). Water Pricing in Agriculture: An OECD Perspective. OECD Publishing.
- Resmî Gazete. (1953). 6200 Sayılı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Teşkilat ve Görevleri Hakkında Kanun.
- Saraç, M. (2014). Öğretmenlerin yenilenebilir enerji algıları. Hacettepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi, 29(4).
- Tarım ve Orman Bakanlığı. (2022). Su Yönetimi Genel Müdürlüğü – Ulusal Su Planı 2023–2030. Ankara.
- U.S. Bureau of Reclamation. (2019). Central Valley Project water rates and contracts overview. U.S. Department of the Interior.
- USDA. (2018). Irrigation Organizations Survey: Water pricing and delivery mechanisms in the United States. U.S. Department of Agriculture.
- Water Framework Directive (WFD). (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of water policy. Official Journal of the European Communities.
- World Bank. (2006). Irrigation water pricing: The gap between theory and practice. World Bank Agriculture and Rural Development Department.
- World Bank. (2017). Beyond Scarcity: Water Security in the Middle East and North Africa. World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1144-9>
- World Bank. (2021). Reforming irrigation water pricing: Evidence from global irrigation management assessments. Water Global Practice.

BÖLÜM 3

Agrifotovoltaik Sistemler (APV/AV): Gıda- Enerji-Su Bağlantısında Yeni Bir Kavramsal Çerçeve Ve Çukurova Uygulaması

Zeynep Zaimoglu¹

¹ Prof. Dr., Çukurova Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü
Orcid: 0000-0002-9573-4781

1. Giriş

Küresel ölçekte gıda, su ve enerji sistemleri üzerinde artan baskılar, sürdürülebilir kalkınma politikalarının yeniden değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Dünya nüfusunun 2050 yılında 9,7 milyara ulaşacağı öngörülmekte olup (UN DESA, 2022), bu durum hem tarımsal üretim kapasitesinin artırılmasını hem de enerji güvenliğinin sağlanmasını gerekli kılmaktadır. Tarımsal üretim günümüzde küresel su tüketiminin yaklaşık %92'sini oluşturarak dünyanın en fazla su tüketen sektörü konumundadır (FAO, 2021). Bununla birlikte, tarım alanları küresel kara yüzeyinin üçte birinden fazlasını kaplamakta, ancak iklim değişikliği nedeniyle giderek daha kırılgan bir yapı göstermektedir. IPCC'nin 2022 değerlendirme raporuna göre, özellikle yarı kurak ve Akdeniz iklim kuşaklarında ürün verimlerinde yüzyıl sonuna kadar %10–25 arası kayıp beklenmektedir (IPCC, 2022). Bu kayıpların en önemli nedenleri arasında artan sıcaklık, azalan yağış, toprak nemindeki düşüş ve ekstrem hava olaylarındaki artış öne çıkmaktadır.

Öte yandan enerji sektörü de benzer bir dönüşüm baskısı altındadır. Fosil yakıt tüketiminin neden olduğu karbon emisyonları küresel ısınmanın temel belirleyicisi olup, uluslararası toplum 2050 yılına kadar net sıfır emisyon hedefine ulaşmayı hedeflemektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları bu dönüşümün temel araçlarından biridir. Uluslararası Enerji Ajansı'na (IEA, 2023) göre güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kapasitesi artışının %60'ından fazlasını oluşturmakta ve 2050 yılında küresel elektrik ihtiyacının %30–50'sini karşılayabilecek potansiyeli taşımaktadır. Ancak, geniş ölçekli güneş enerjisi santrallerinin çoğu zaman tarım alanları üzerine kurulması, gıda güvenliği ve arazi yönetimi açısından yeni çatışmalar doğurmaktadır. Tarım arazilerinin klasik güneş enerji yatırımlarıyla dönüşüme uğraması, uzun vadede toprak organik karbon kaybına, biyoçeşitlilik azalmasına ve yerel iklimin olumsuz etkilenmesine yol açabilmektedir (Hernandez et al., 2015).

Bu bağlamda Agrivoltaik (AV) / Agriphotovoltaic (APV) sistemler, tarım ve enerji üretiminin aynı arazi üzerinde entegre edilmesini mümkün kılan yenilikçi bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. İlk olarak 1980'lerde teorik düzeyde önerilen AV sistemleri (Goetzberger & Zastrow, 1982), 2000'li yıllardan itibaren uygulamalı olarak geliştirilmeye başlanmış, son on yılda ise özellikle Avrupa, Asya ve Kuzey Amerika'da yaygın Ar-Ge çalışmalarına konu olmuştur. AV sistemlerinin temel yaklaşımı, bitkilerin ışık ve sıcaklık gereksinimlerini optimize eden PV panel yerleşimleri ile hem elektrik üretimini hem de tarımsal verimi aynı anda artırabilmektir. Özellikle gölge toleransı olan veya yarı gölge koşullarından fayda sağlayan ürünlerde bu sistemler verim artışı sağlayabilmektedir.

Bilimsel literatürde son yıllarda AV sistemleri üzerine yapılan çalışmalar önemli bulgular ortaya koymaktadır. Örneğin, Arizona'da yapılan deneylerde

domates veriminde AV koşullarında %200'e kadar artış bildirilmiştir (Barron-Gafford et al., 2019). Japonya ve Fransa'da yapılan araştırmalar, marul, patates, üzüm ve mısır gibi ürünlerde AV sistemlerinin hem su kullanım verimliliğini (WUE) artırdığını hem de aşırı güneş radyasyonuna bağlı fotoinhibisyonu azalttığını ortaya koymuştur (Marrou et al., 2013a; Sekiyama & Nagashima, 2019). Ayrıca AV sistemleri PV panellerinin altındaki daha serin iklim sayesinde panel verimliliğini de artırarak çift yönlü bir kazanım sağlamaktadır.

Su kaynaklarının yoğun baskı altında olduğu Akdeniz Havzası gibi bölgelerde AV sistemleri özellikle önemlidir. Türkiye özelinde, hem küresel iklim değişikliğinin etkilerinin belirginleştiği hem de tarımsal üretimin ekonomik değerinin yüksek olduğu Çukurova Bölgesi, agrivoltaik araştırmalar için stratejik bir alan niteliğindedir. Bölgenin yıllık güneşlenme süresi yüksek olup; narenciye, zeytin, pamuk ve sebze üretimi bölge ekonomisinin temel bileşenlerindendir. Bu nedenle hem tarımsal verimliliği korumak hem de yenilenebilir enerji üretimini artırmak açısından AV sistemlerinin potansiyeli önem arz etmektedir.

Bu kitap bölümü, agrivoltaik sistemlerin teorik altyapısını, ekolojik ve ekonomik etkilerini, sürdürülebilirlik açısından sunduğu fırsatları ve mevcut literatürdeki boşlukları ele alarak Çukurova Bölgesi için uygulanabilir bir model sunmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, AV sistemlerinin çok yıllık bitkiler—özellikle narenciye ve zeytin plantasyonları—üzerindeki etkilerine ilişkin henüz sınırlı olan bilimsel bilgi birikimine katkı sağlamaktadır. Bitki büyüme parametreleri, su tüketimi, mikroiklim geri bildirimleri ve karbon tutumuna ilişkin ölçümlerden oluşan bir veri seti geliştirilerek hem çiftçi hem yatırımcı hem de politika yapımcılar için karar destek mekanizmaları oluşturulması hedeflenmektedir. Bu proje, uluslararası literatürde hâlâ erken aşamada olan “meyve bahçelerinde agrivoltaik uygulama” alanında Türkiye'deki ilk kapsamlı çalışmalardan birini oluşturma potansiyeline sahiptir.

2. Tarım Arazileri Üzerindeki Enerji Yatırımlarının Mevcut Problemleri

Tarımsal üretim alanları; toprak, su, biyolojik çeşitlilik ve ekosistem hizmetlerinin bir arada işlediği kompleks sosyal-ekolojik sistemlerdir. Modern enerji yatırımlarının özellikle geniş ölçekli güneş enerjisi santrallerinin (GES) tarım arazileri üzerine veya yakınına kurulması, bu temel bileşenlerin birçoğu üzerinde doğrudan veya dolaylı etkilere yol açmaktadır. Bu etkiler yalnızca fiziksel arazi kullanım değişikliğinden ibaret olmayıp, toprak karbon döngüsünden mikroiklim koşullarına, su rejiminden ekosistem fonksiyonlarına kadar geniş bir alanı kapsamaktadır. Bu bölümde, tarım-enerji arazi çatışmasının günümüzde neden kritik bir konu haline geldiği bilimsel literatür ışığında ayrıntılı olarak tartışılmaktadır.

a) Toprak Organik Karbon (SOC) Kaybı ve Toprak Kalitesinin Azalması

Toprak organik karbonu, tarım topraklarının verimliliğini, su tutma kapasitesini ve mikroorganizma aktivitesini belirleyen temel göstergelerden biridir. GES kurulumu için gerekli olan yüzey tesviyesi, bitki örtüsünün kaldırılması ve çoğu zaman toprağın sıkıştırılması, SOC stoklarında önemli kayıplara yol açmaktadır. Hernandez ve meslektaşlarının (2015) ABD güneybatısında yaptığı analize göre, klasik güneş enerji santrallerinin kurulumu sırasında toprak organik karbonunda %25–40 arasında kayıp meydana gelebilmektedir. Benzer bulgular Birleşik Krallık ve İspanya'daki çalışmalarda da bildirilmiş; özellikle yüzeydeki biyolojik kabuğun bozulması, toprağın hem karbon tutma kapasitesini hem de besin döngüsünü olumsuz etkilemiştir (Armstrong et al., 2016).

Bunun tarımsal üretim açısından anlamı oldukça kritiktir. Toprağın su tutma kapasitesi azalmakta, bitkilerin kök gelişimi sınırlanmakta, düşük organik madde düzeyleri verim üzerinde uzun vadeli negatif etkilere yol açmakta ve azalan toprak biyolojisi bitki besin maddesi döngüsünü yavaşlatmaktadır. Tarım Bakanlığı ve FAO verileri, SOC seviyesindeki her %1'lik artışın su tutma kapasitesini hektar başına 150–250 ton artırabildiğini göstermektedir (FAO, 2020). Bu nedenle SOC kaybı, özellikle yarı kurak iklimlerde son derece ciddi bir tarımsal risk faktörü olarak değerlendirilmektedir.

b) Arazi Kullanım Değişikliklerine Bağlı Sera Gazı Emisyonları

GES projeleri yenilenebilir enerji üretse de, kurulum süreçlerinde arazi kullanım değişikliğinden (LULUC – Land Use and Land Use Change) kaynaklanan karbon emisyonları dikkate alındığında, net karbon dengesi kısa vadede her zaman olumlu olmayabilir. GES alanlarına dönüştürülen tarım arazilerinde üst toprağın kaldırılması, mevcut bitki örtüsünün yok edilmesi, toprağın sıkışması ve buna bağlı olarak CO₂, CH₄ ve N₂O salınımının artması gibi etkiler ortaya çıkmaktadır.

Gagnon ve çalışma arkadaşları (2012), geniş ölçekli PV kurulumlarının hektar başına 15–50 ton CO₂ eşdeğeri emisyonu yol açabileceğini ortaya koymuştur. Bu durum, özellikle verimli tarım topraklarının yok olmasıyla birleştiğinde, küresel iklim hedefleri açısından çelişkili sonuçlar doğurabilmektedir. Ayrıca toprağın bozulması, sistemin net karbon yutağı konumundan karbon kaynağı konumuna dönüşmesine neden olarak uzun vadeli emisyon yükünü artırabilmektedir (Lal, 2018).

c) PV Isı Adası Etkisi (PV Heat Island Effect)

Geniş güneş paneli kümelerinin bulunduğu alanlarda panellerin güneş ışığını absorbe etmesiyle ortaya çıkan PV ısı adası etkisi, tarımsal üretimi doğrudan etkileyen yerel sıcaklık artışlarına yol açmaktadır. Barron-Gafford ve

arkadaşlarının (2016) Arizona’da yaptığı saha çalışması, büyük PV alanlarında gece boyunca çevreye göre 3–4°C daha yüksek sıcaklık oluşabildiğini göstermiştir.

Bu mikroiklim değişiklikleri, bitkilerde ısı stresinin artması, evapotranspirasyonun yükselmesi, çiçek ve meyve tutumunda düşüşler yaşanması ve toprak nem kaybının hızlanması gibi sonuçlara neden olabilmektedir. Akdeniz iklimi gibi zaten sıcaklık stresinin yoğun olduğu bölgelerde bu etki, verim kayıplarını daha da şiddetlendirebilmektedir.

d) Biyoçeşitlilik Kayıpları ve Ekosistem Hizmetlerinin Azalması

Tarım arazileri yalnızca üretim alanları değil, aynı zamanda pek çok ekosistem hizmetinin gerçekleştiği dinamik sistemlerdir. Büyük ölçekli enerji yatırımları, bu hizmetleri de zayıflatmaktadır. GES projeleri sonucunda habitat parçalanması, toprak omurgasızlarında azalma, polinatör popülasyonlarında düşüş, kuş ve sürüngen habitatlarının bozulması ve toprak mikrobiyal çeşitliliğinde azalma gibi etkiler ortaya çıkabilmektedir.

Walston ve çalışma arkadaşları (2018), güneş enerjisi santrallerinin inşa edildiği bölgelerde özellikle polinatör böcek popülasyonlarında %20–30 oranında düşüş görülebileceğini ortaya koymuştur. Yapılan araştırmalar, PV altı alanlarda normale kıyasla bitki çeşitliliğinin yarı yarıya azaldığını göstermektedir (Montag et al., 2016). Biyoçeşitliliğin azalması yalnızca ekolojik bir problem olarak değil; ürün kalitesini, tozlaşma verimliliğini, toprak sağlığını ve uzun vadeli sürdürülebilirliği olumsuz etkileyen ciddi bir tarım ekonomisi sorunu olarak da ele alınmalıdır.

e) Mikroiklim Değişikliklerinin Bitkisel Verime Etkileri

GES kurulumu çoğu zaman rüzgâr rejiminde değişime, gündüz–gece sıcaklık farklarında bozulmaya, toprak yüzeyinde radyasyon dengesinin değişmesine ve nem rejiminde farklılaşmaya yol açmaktadır. Bu mikroiklim değişikliklerinin tarımsal verim üzerindeki etkisi özellikle sıcaklık stresi ve fotosentetik aktivite üzerinden hissedilmektedir. Artan toprak sıcaklıkları, bitki kök bölgesinde oksijen eksikliğine neden olabilir ve kök büyümesi üzerinde baskı oluşturabilir.

Fransa’nın Montpellier bölgesindeki deneylerde, yanlış konumlandırılmış PV panellerinin sebze üretiminde %8–35 arasında verim düşüşüne, toprak neminde ise %15–25 düzeyinde azalmaya yol açtığı belirlenmiştir (Marrou et al., 2013b). Bu bulgular, klasik GES modellerinin tarım alanlarında yaygın biçimde uygulanmasının sürdürülebilir üretim hedefleriyle çelişebileceğini göstermektedir.

f) Arazi Kullanım Çakışması ve Gıda Güvenliği Riski

Küresel ölçekte tarım alanlarının enerji yatırımları ile rekabeti hızla artmaktadır. IEA’nın (2022) verilerine göre, geniş ölçekli PV projelerinin

yaklaşık %40'ı potansiyel tarım alanlarının içinde veya yakınında planlanmaktadır. Bu durum, özellikle verimli sulanan tarım alanlarının kaybı, gıda arz güvenliğinde azalma, sosyo-ekonomik baskılar ve çiftçi-yatırımcı çatışmaları gibi sonuçlar yaratmaktadır.

Türkiye’de de GES projelerinin önemli bir bölümünün tarım alanlarına yönelmesi, uzun vadeli arazi planlaması açısından önemli riskler ortaya koymaktadır. Tarım ve Orman Bakanlığı’nın 2023 raporuna göre, son 10 yılda yaklaşık 300.000 dönüm tarım alanı enerji yatırımları nedeniyle kullanım dışı kalmıştır. Bu tür kayıplar, özellikle iklim değişikliğinin etkilerinin yoğunlaştığı ve tarımsal üretim baskısının arttığı dönemlerde, gıda güvenliğini doğrudan tehdit eden bir faktör haline gelmektedir.

Yukarıda özetlenen tüm riskler, klasik güneş enerjisi santrallerinin tarım alanlarında uzun vadeli sürdürülebilirliğini sorgular hale getirmiştir. Tarım–enerji rekabetinin, yerini tarım–enerji entegrasyonuna bırakması gerektiği açıktır. Agrivoltaik sistemlerin ortaya çıkış nedeni tam da bu çatışmayı çözme ihtiyacıdır. AV sistemleri, SOC kaybını azaltma, mikroiklimi dengeleme, biyoçeşitliliği koruma, çift yönlü (ürün ve enerji) gelir yaratma, arazi kullanım verimliliğini artırma, gıda güvenliğini tehdit etmeme ve su kıtlığına karşı tampon mekanizması oluşturma potansiyeline sahiptir. Bu nedenle uluslararası literatürde, tarım alanlarında klasik GES modellerinin yerini hızla agrivoltaik sistemlerin almaya başladığı görülmektedir.

3. Algoritma ve Model Geliştirme: Agrivoltaik Sistemler İçin Bütüncül Yaklaşım

Agrivoltaik sistemler (AV), tarımsal üretim ile enerji üretimini aynı mekânsal çerçevede birleştiren yeni nesil sürdürülebilirlik çözümleridir. Bu sistemlerin performansı, yalnızca saha gözlemlerine değil; bitki fizyolojisinden mikroiklim dinamiklerine, panel mimarisinden ekonomik çıktılara uzanan çok katmanlı veri setlerinin analitik olarak işlenmesine bağlıdır. Bu nedenle, AV sistemlerinin bilimsel olarak değerlendirilmesi ve uygulanabilir politikalar üretilebilmesi için kapsamlı modellerin ve algoritmik yapıların geliştirilmesi kritik bir gerekliliktir. Güncel literatür, AV sistemlerinin geleneksel tarım veya klasik PV kurulumlarına kıyasla çok daha karmaşık bir etkileşim ağı oluşturduğunu göstermektedir (Dupraz et al., 2011; Majumdar & Pasqualetti, 2018). Bu karmaşıklığın anlaşılması, karar vericilerin riskleri ve fırsatları net biçimde değerlendirmesini sağlayacak bilimsel araçların geliştirilmesine ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymaktadır.

Bu kitap bölümünde, agrivoltaik uygulamaların analizinde kullanılabilecek dört temel modelleme bileşeni ele alınmaktadır: enerji–gıda–su optimizasyon modeli, bitki büyüme–mikroiklim etkileşim modeli, karar destek sistemleri ve ekonomik fizibilite araçları. Buna ek olarak, yapay zekâ tabanlı arayüzlerin AV

sistemlerinin yönetim süreçlerine entegre edilmesinin sağlayacağı avantajlar da tartışılmaktadır.

3. 1. Enerji–Gıda–Su Optimizasyon Modeli

AV sistemlerinde en kritik bileşenlerden biri, enerji üretimi ile tarımsal verimin aynı anda optimize edilebilmesidir. Literatür, panellerin gölgeleme oranı, panel yüksekliği, panel dizilim yoğunluğu, panel eğim açısı ve panellerin yönelim stratejilerinin bitki büyümesini doğrudan etkilediğini göstermektedir (Marrou et al., 2013; Barron-Gafford et al., 2019). Dolayısıyla, her ürün türü için uygun panel konfigürasyonunu belirlemek çok değişkenli bir optimizasyon problemidir.

Bu model üç ana bileşenden oluşur:

1. Enerji üretim bileşeni: Panel sıcaklığı, ısıtım miktarı, panel verimi, gölgeleme paterni ve iklim değişkenlerine dayalı fotovoltaiik üretim tahmini.
2. Tarım bileşeni: Bitkinin ışık doyum noktası, su ihtiyacı, evapotranspirasyon (ET), kök gelişimi ve fotosentetik performans gibi parametrelerle ilişkilendirilmiş verim tahmin modeli.
3. Su bileşeni: Toprak nemi, su tutma kapasitesi, sulama gereksinimi, gölgelenmiş ve tam güneş alan bölgelerde buharlaşma farkları.

Bu üç bileşenin entegrasyonu, AV sisteminin toplam arazi kullanım verimliliğini ve enerji–gıda–su bağlamındaki kazanımlarını niceliksel olarak ortaya koyar. Özellikle FAO’nun “Water Productivity Framework” yaklaşımı bu bütüncül modelleme için temel metodolojik bir altyapı sunmaktadır (FAO, 2021).

AV alanlarında yapılan çalışmalar, doğru modelleme ile su kullanım verimliliğinin %20–70 oranında artırılabilirliğini, panel yerleşim optimizasyonunun ise ürün verimindeki dalgalanmaları minimize ettiğini göstermektedir (Valle et al., 2017).

3.2 Bitki Büyüme – Mikroiklim Etkileşimi Modeli

AV sistemlerinde bitki büyümesi ile mikroiklim arasındaki ilişki, modellenmenin en karmaşık fakat en belirleyici kısmıdır. Panellerin yarattığı gölge, rüzgâr akımı, sıcaklık ve nem değişiklikleri bitkinin fizyolojik süreçlerinin neredeyse tamamını etkiler. Son yıllarda geliştirilen mikroiklim temelli bitki büyüme modelleri özellikle önem kazanmıştır.

Bu modeller şu parametreleri içerir:

- PAR (Photosynthetically Active Radiation) yoğunluğu ve dağılımı
- Yaprak sıcaklığı
- VPD (buhar basıncı açığı)

- Toprak sıcaklığı ve nemi
- Rüzgâr hızı ve yönü
- Kök bölgesi oksijen düzeyi
- Bitki stres enzimleri
- Fotosentetik hız ve stomal iletkenlik

Barron-Gafford et al. (2016, 2019), AV sistemlerinin yaprak sıcaklığını düşürerek bitkide fotoinhibisyonu azalttığını ve fotosentetik verimi artırdığını göstermiştir. Marrou ve arkadaşları (2013) ise gölge altındaki buharlaşma kaybının geleneksel tarım sistemlerine kıyasla belirgin derecede az olduğunu ortaya koymuştur.

Bu ölçümlerin matematiksel modellerle birleştirilmesi, ürün bazında AV sistemlerinin potansiyel verim etkisini tahmin etmeyi mümkün kılar. Zeytin, narenciye, bağcılık gibi çok yıllık bitkiler için ise bu tür modeller henüz literatürde sınırlıdır; bu nedenle AV sistemlerinin uzun dönemli fizyolojik etkilerini öngöreceği yeni modeller geliştirilmesi gerekmektedir.

3.3. Agrivoltaik Sistemler İçin Karar Destek Mekanizmaları

Karar destek sistemleri (Decision Support Systems – DSS), AV sistemlerinin hangi koşullarda uygulanabileceğini, yatırımcılar ve çiftçiler için ekonomik ve teknik risklerin nasıl minimize edilebileceğini gösteren araçlardır. AV için geliştirilen DSS'ler genel olarak çok kriterli karar verme (MCDA), coğrafi bilgi sistemleri (GIS), senaryo analizi ve makine öğrenmesi tekniklerini bir arada kullanır.

Bir AV-DSS aşağıdaki soruları yanıtlar:

- Panel yoğunluğu artırılırsa ürün verimi nasıl değişir?
- Su stresi altındaki bitkiler için ideal panel gölge oranı nedir?
- Enerji üretimi maksimuma çıkarılırken ürün kaybı nasıl minimize edilir?
- Farklı ürün desenlerinde hangi AV mimarisi daha uygundur?
- Arazi eğimi ve toprak tipi AV performansını nasıl etkiler?

Majumdar & Pasqualetti (2018), AV tasarımında MCDA kullanımının özellikle sosyo-ekonomik kriterlerin (çiftçi kabulü, gelir dağılımı, yerel politika uyumu) değerlendirilmesinde kritik olduğunu ortaya koymuştur. Avrupa'daki APV-Pilot projeleri ise DSS sistemlerinin yer seçiminde hata payını %30'dan %5'e düşürdüğünü göstermektedir.

3.4. Ekonomik Fizibilite Modelleri

AV sistemlerinin uygulanabilirliği yalnızca teknik performansa değil, ekonomik gerçekçiliğe de bağlıdır. Ekonomik fizibilite modelleri, PV üretim gelirleri, tarımsal gelir, bakım maliyetleri, amortisman süreleri ve karbon kredisi fırsatlarını içeren çok bileşenli bir analiz sunar.

Ekonomik modellerde yer alan temel unsurlar şunlardır:

- PV üretim geliri
- Tarımsal verim değişiminin ekonomik karşılığı
- Kurulum maliyetleri
- İşletme & bakım maliyetleri
- Farklı panel tiplerine göre geri dönüş süreleri
- Karbon piyasası gelir potansiyeli
- Sera gazı azaltımının ekonomik değeri

Fraunhofer ISE tarafından Almanya’da yürütülen AV projelerinde, uygun tasarım koşullarında tarımsal üretim ve enerji gelirinin toplamının geleneksel PV sistemlerine göre %20–40 daha yüksek olabildiği belirlenmiştir (Weselek et al., 2019). Japonya’daki solar-sharing sistemlerinde çiftçi gelirinin AV öncesine göre ortalama %30 arttığı bilinmektedir (Sekiya & Nagashima, 2019).

3.5. Yapay Zekâ Tabanlı Arayüzler ve Veri-Model Entegrasyonu

Modern AV sistemlerinin yönetiminde yapay zekâ teknolojilerinin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Makine öğrenmesi, derin öğrenme ve dijital ikiz (digital twin) modelleri özellikle veri yoğun agrivoltaik alanlarda yüksek hassasiyette öngörü sağlamaktadır.

Yapay zekâ tabanlı arayüzler:

- Panel gölgeleme optimizasyonunu gerçek zamanlı ayarlayabilir,
- Bitki stresini sensör verileriyle erkenden tespit edebilir,
- Su yönetiminde otomatik karar algoritmaları oluşturabilir,
- Panel-temelli mikroiklim değişikliklerini simüle edebilir,
- Ürün verimi tahminlerini haftalık olarak güncelleyebilir.

Gelişmiş veri işleme kapasiteleri sayesinde AV sistemlerinde gerek enerji üretimi gerek tarımsal üretim için öngörü doğruluğu %90’ın üzerine çıkabilmektedir (NREL, 2020).

Bu bölümde ifade edilen modelleme ve algoritmik yaklaşımlar, agrivoltaik sistemlerin yalnızca bir enerji veya tarım projesi olarak değil; çok boyutlu sosyal-ekolojik-teknolojik bir sistem olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Enerji–gıda–su optimizasyonu, bitki fizyolojisi ve mikroiklim analizi, ekonomik fizibilite ve yapay zekâ destekli karar mekanizmalarının bir arada kullanılması, AV uygulamalarının başarısını belirleyen temel faktörlerdir.

Bu bütüncül yaklaşım; çiftçiler için daha öngörülebilir üretim süreçleri, yatırımcılar için daha güvenilir geri dönüş analizleri ve politika yapıcılar için sürdürülebilir arazi kullanım planlaması açısından erken uyarı ve yüksek doğrulukta karar desteği sağlamaktadır.

SONUÇ

Agrivoltaik (AV) sistemler, çağımızın en önemli iki sürdürülebilirlik krizinin – enerji arz güvenliği ve gıda güvenliği – aynı arazi üzerinden eş zamanlı çözülmesini sağlayan, yenilikçi ve dönüştürücü bir arazi kullanım modeli sunmaktadır. Geleneksel anlayışta enerji üretimi ile tarımsal üretim birbirinin rakibi olarak görülürken, agrivoltaik yaklaşım bu ikili rekabeti işbirliğine çevirerek tarım alanlarının fonksiyonelliğini artırmakta, yenilenebilir enerjinin yaygınlaşmasına katkıda bulunmakta ve iklim değişikliğinin etkileri karşısında kırılganlıkları azaltmaktadır. AV sistemleri, tek başına güneş enerjisi santrallerinin yol açtığı toprak sıkışması, biyoçeşitlilik kaybı, aşırı ısınma, buharlaşma artışı ve arazi kullanım çatışması gibi olumsuzlukları bertaraf etme potansiyeline sahiptir. Bu yönüyle, sürdürülebilir arazi yönetimi için yeni bir paradigma sunmaktadır.

AV sistemlerinin öneminin en belirgin biçimde hissedildiği bölgeler, iklim değişikliği etkilerine en açık olan yarı kurak ve sıcak iklim kuşaklarıdır. Akdeniz Havzası, 21. yüzyıl boyunca küresel iklim değişikliğinden en olumsuz etkilenecek bölgeler arasında gösterilmektedir. IPCC raporları, bu coğrafyada sıcak hava dalgalarının sıklığının artacağını, yağış rejimlerinde düzensizlik yaşanacağını, yıllık ortalama toprak neminin azalacağını ve tarımsal verimliliğin birçok üründe %10–30 arasında düşebileceğini öngörmektedir. Bu nedenle, bölgedeki tarımsal üretimin geleceği, iklim dayanıklılığını artıran yeni üretim modellerine duyulan ihtiyaçla doğrudan ilişkilidir. AV sistemleri, gölgeleme yoluyla bitki sıcaklığını düşürmesi, evapotranspirasyonu azaltması, toprak nemini koruması, fotosentetik stresin önüne geçmesi ve su kullanım verimliliğini artırması gibi mekanizmalarla tam da bu ihtiyaca yanıt vermektedir.

Avrupa’da, ABD’de ve Asya Pasifik’te yürütülen çalışmalar, AV sistemlerinin özellikle aşırı ısınma ve su stresi altındaki ürünlerde verimi koruyabildiğini, hatta kimi durumlarda artırabildiğini göstermektedir. Örneğin, yarı kurak koşullarda domates üretiminde verimin iki kattan fazla artabildiği; marul ve ıspanak gibi C3 bitkilerde kalite ve büyüme performansının yükseldiği; yonca gibi yem bitkilerinde ise biyokütle artışı sağlandığı bildirilmektedir. Bu

sonuçlar, Çukurova, Batı Akdeniz, Güneydoğu Anadolu ve Ege'nin kurak bölümleri gibi Türkiye'nin tarımsal açıdan stratejik bölgelerinde AV uygulamalarının kritik önemini ortaya koymaktadır.

AV sistemlerinin sürdürülebilirlik açısından bir diğer kritik yönü, kıt arazi kaynaklarının daha verimli kullanılmasını sağlamasıdır. Tarım alanlarının kentleşme, endüstriyel genişleme ve enerji yatırımları nedeniyle giderek daraldığı bir dünyada, tek bir arazi üzerinden iki farklı üretim sisteminin işletilmesi, hem çevresel hem ekonomik hem de toplumsal faydaları birlikte sunmaktadır. Arazi kullanım verimliliğinin %60–80 oranında artabildiği bilimsel çalışmalarla desteklenmekte; böylece hem gıda üretimi azalmamakta hem de yenilenebilir enerji yatırımları için yeni alan ihtiyacı doğmamaktadır. Tarım arazilerinin yok edilmesi yerine, bu alanların çok amaçlı kullanılması sürdürülebilir kalkınma ilkeleriyle daha uyumludur.

Ekonomik açıdan bakıldığında, AV sistemleri çiftçiye ve yatırımcıya çift yönlü bir gelir modeli sunarak kırsal ekonominin güçlendirilmesine katkıda bulunmaktadır. Çiftçiler hem tarımsal üretime devam edebilmekte hem de elektrik üretimi yoluyla ek gelir elde edebilmektedir. Ayrıca üretimde yaşanan riskler çeşitlenmekte, kuraklık veya piyasa koşullarına bağlı gelir dalgalanmaları daha yönetilebilir hale gelmektedir. AV uygulamalarına yönelik devlet teşviklerinin artması, karbon piyasalarının yaygınlaşması ve enerji depolama teknolojilerinin gelişmesi ile birlikte, agrivoltaik sistemlerin ekonomik cazibesi daha da güçlenecektir.

Toplumsal açıdan değerlendirildiğinde, AV sistemleri yenilenebilir enerji projelerine yönelik yerel topluluk tepkilerini azaltan bir model sunmaktadır. Geleneksel GES projelerine yönelik en yaygın eleştiri, tarım alanlarının kaybı ve yerel üretimin zarar görmesi olurken; AV sistemleri tam tersine tarımı korunabilir ve desteklenebilir bir konuma taşımaktadır. Bu durum, özellikle kırsal toplumların enerji dönüşümüne daha olumlu bakmasını sağlayan bir sosyal fayda oluşturmaktadır.

AV sistemlerinin bilimsel ve teknolojik gelişimi devam ettikçe, panel mimarisi, sensör teknolojileri, mikroiklim modellemeleri ve yapay zekâ destekli karar mekanizmaları gibi alanlarda yeni yenilikler ortaya çıkmaktadır. Yarı şeffaf paneller, bifacial (çift yüzlü) paneller, dikey PV sistemleri ve akıllı izleme mekanizmaları sayesinde hem enerji üretimi hem tarımsal verimlilik daha da optimize edilebilmektedir. Bu gelişmeler, AV'yi yalnızca çevresel sorunları hafifleten bir teknoloji olmaktan çıkarıp tarım 4.0 ve enerji 4.0 yaklaşımlarının kesişim noktası haline getirmektedir.

Sonuç olarak, agrivoltaik sistemler sürdürülebilirlik, iklim dayanıklılığı, enerji güvenliği ve gıda güvenliği açısından çığır açıcı bir fırsat sunmaktadır. Tarım alanlarının korunmasını, verimli kullanılmasını ve ekonomik olarak güçlendirilmesini sağlayan AV modelleri, iklim değişikliği ile mücadelede hem

azaltım hem uyum boyutlarına katkıda bulunmaktadır. Özellikle aşırı sıcaklıklar ve kuraklık riskinin hızla arttığı Akdeniz Havzası gibi bölgelerde AV sistemleri, geleceğin tarımsal üretim modelleri arasında öncü bir yer edinmektedir. Hem bilimsel literatür hem de uygulamalı çalışmalar, agrivoltaik sistemlerin yalnızca bir alternatif değil, sürdürülebilir tarımsal üretimin ve enerji dönüşümünün geleceğini şekillendirecek temel bir bileşen olduğunu göstermektedir.

Bu bağlamda AV sistemleri, 21. yüzyılın en kritik sürdürülebilirlik hedeflerinden biri olan “gıda–su–enerji” üçlü bağlantısında yeni ve bütüncül bir çözüm sunarak, hem çevresel hem ekonomik hem de toplumsal açıdan çok yönlü bir dönüşümün kapısını aralamaktadır.

Kaynaklar

- Armstrong, A., Ostle, N., & Whitaker, J. (2016). Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling. *Environmental Research Letters*.
- Barron-Gafford, G. A., et al. (2016). The Photovoltaic Heat Island Effect: Larger solar power plants increase local temperatures. *Nature Scientific Reports*.
- Barron-Gafford, G. A., et al. (2019). Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability*.
- Barron-Gafford, G. A., et al. (2019). Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability*.
- Barron-Gafford, G. A., et al. (2019). Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability*, 2, 848–855.
- Dupraz, C., et al. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops. *Agronomy for Sustainable Development*.
- Dupraz, C., et al. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops: First agronomic results. *Agronomy for Sustainable Development*.
- FAO (2020). *Soil Organic Carbon: the hidden potential*.
- FAO (2021). *The State of Food and Agriculture 2021*. Food and Agriculture Organization.
- FAO (2021). *Water Productivity: Principles and Applications*.
- Gagnon, P., et al. (2012). *Land-Use Requirements for Solar Power Plants in the United States*. NREL.
- Goetzberger, A., & Zastrow, A. (1982). On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation. *International Journal of Solar Energy*.
- Goetzberger, A., & Zastrow, A. (1982). On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation. *International Journal of Solar Energy*, 1(1), 55–69.
- Hernandez, R. R., et al. (2015). Environmental impacts of utility-scale solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Hernandez, R., Hoffacker, M., & Field, C. (2015). Effects of solar energy development on biodiversity and ecosystem services in the southwest US. *Environmental Reviews*, 23(4), 417–427.
- IEA (2022). *Renewables 2022 Global Outlook*.
- IEA (2023). *World Energy Outlook 2023*. International Energy Agency.
- IPCC (2022). *AR6 Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*.

- Lal, R. (2018). Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration. *Journal of Soil and Water Conservation*.
- Majumdar, D., & Pasqualetti, M. (2018). Dual use of agricultural land: Introducing ‘agrivoltaics’ in the United States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Marrou, H., Dufour, L., & Wery, J. (2013a). How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil–plant system? *European Journal of Agronomy*.
- Marrou, H., et al. (2013). Microclimate and water fluxes under agrivoltaic systems. *Agricultural and Forest Meteorology*.
- Marrou, H., et al. (2013). Microclimate under agrivoltaic systems and its effect on crop growth. *Agricultural and Forest Meteorology*.
- Marrou, H., et al. (2013b). Microclimate under agrivoltaic systems: Effects on crop growth and water evaporation. *Agricultural and Forest Meteorology*.
- Montag, H., et al. (2016). The impact of solar farms on local biodiversity. UK BRE National Solar Centre.
- NREL (2020). Machine Learning in Solar Energy Forecasting.
- Sekiyama, T., & Nagashima, A. (2019). Solar sharing and agricultural revitalization in Japan.
- Sekiyama, T., & Nagashima, A. (2019). Solar sharing for both food and clean energy production. *Journal of Cleaner Production*.
- Sekiyama, T., & Nagashima, A. (2019). Solar sharing for both food and clean energy production: Performance of agrivoltaic systems for corn, lettuce, and soybean in Japan. *Journal of Cleaner Production*, 253, 119630.
- UN DESA (2022). World Population Prospects 2022.
- Valle, B., et al. (2017). Increasing water use efficiency with agrivoltaics.
- Walston, L., et al. (2018). A review of solar energy’s impacts on wildlife. *Environmental Science & Technology*.
- Weselek, A., et al. (2019). Agrivoltaic systems: Applications, challenges, and opportunities. *Sustainable Energy*.

BÖLÜM 4

Retinal Damar Morfolojisinin Görüntü İşleme Destekli Nicel Analizi için Ağırlıklı Eğrilik Tabanlı Kıvrımlılık Skoru Tespiti

Güray Sonugür¹

¹ Doç. Dr., Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi Mekatronik Mühendisliği, 0000-0003-1521-7010

I. GİRİŞ

Retina, vasküler sağlığın doğrudan ve non-invaziv olarak değerlendirilebildiği eşsiz bir pencere sunmaktadır (Gao, 2023). Retinal damarların morfolojisi, özellikle damar çapı, fraktal boyut ve kıvrımlılık (tortuosity) gibi parametreler, çeşitli oküler ve sistemik hastalıkların erken teşhis ve takibinde önemli biyobelirteçler olarak kabul edilmektedir (Torp, 2023). Bu parametreler, retinal damar sistemindeki yapısal değişiklikleri yansıtmanın yanı sıra, vasküler ağın yoğunluğunu ve geometrik özelliklerini de temsil eder (Gao, 2023). Görüntüleme teknolojilerinin ilerlemesi, işlemlerin doğruluğunu artırmış ve yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilmesini sağlamıştır. Özellikle, optik koherens tomografi (OCT) ve optik koherens tomografi anjiyografi (OCTA) gibi modern görüntüleme teknikleri, damarların yüksek çözünürlükte analizini ve kıvrımlılıklarının doğru bir şekilde ölçülmesini mümkün kılmaktadır (Ramos et al., 2018; Williams, 2015).

Retinal damarların kıvrımlılığı, damarların düz bir çizgiden sapma derecesini ifade eder ve normalde yaşla birlikte veya çeşitli patolojik durumlar altında artabilir (Abdalla et al., 2015). Diyabetik retinopati, hipertansiyon, kardiyovasküler hastalıklar ve serebrovasküler hastalıklar gibi birçok önemli vasküler ve sistemik hastalıkla ilişkilendirilmiştir (Gao, 2023; Ramos, 2019; Song, 2022). Özellikle diyabetik retinopati gibi durumlarda, dal arteriyel kıvrımlılığın hastalığın başlangıcı ve ilerlemesi ile anlamlı derecede ilişkili olduğu gösterilmiştir (Song, 2022). Son yıllarda yapılan çalışmalar, retinal damar kıvrımlılığının bipolar bozukluk ve şizofreni gibi psikiyatrik bozukluklarla da ilişkili olabileceğini ortaya koymuştur (Appaji et al., 2019; Atagun et al., 2022). Retina ve beyin mikro-vaskülatürünün ortak morfolojik, fizyolojik ve patolojik özelliklere sahip olması nedeniyle, retinal vasküler inceleme serebral vaskülatürün dolaylı bir değerlendirmesini sağlamaktadır (Appaji, 2019)[6]. Şizofreni ve bipolar bozukluk hastalarında artan retinal arteriyoller kıvrımlılık gözlemlenmiştir, bu da bu bozuklukların vasküler patolojileri hakkında önemli bilgiler sunmaktadır (Appaji, 2019). Bu nedenle, retinal damar kıvrımlılığının doğru ve objektif bir şekilde nicelendirilmesi, bu hastalıkların erken tespiti, risk değerlendirmesi ve tedavi yanıtının izlenmesi açısından büyük klinik potansiyel taşımaktadır.

Bugüne kadar, retinal damar kıvrımlılığını ölçmek için çeşitli yöntemler önerilmiştir. Bu yöntemler genellikle üç ana gruba ayrılır: yay uzunluğu/kiriş uzunluğu oranı tabanlı yöntemler, eğrilik tabanlı yöntemler ve eğim zincir kodu (SCC) tabanlı yöntemler (Gao, 2023; Hart et al., 2019). Yay uzunluğu/kiriş uzunluğu oranı, basitliği nedeniyle en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir (Gao, 2023). Ancak, düzgün eğrilığe sahip veya eğrilik yönü değişen damarların kıvrımlılığını doğru bir şekilde yansıtmakta yetersiz kalabilir. Eğrilik tabanlı yöntemler, damar segmentlerinin eğrilik değişimlerini dikkate alarak daha hassas

ölçümler sunar. Bununla birlikte, mevcut yöntemlerin çoğu, damar segmentlerinin tamamen matematiksel temsillerine dayanmakta ve uzmanların tanısall deneyimlerine dayalı olarak analiz ettikleri ek alanla ilgili bilgileri (örneğin, arter ve ven ayrımı, optik diske ve foveaya uzaklık, damar çapı) yeterince entegre etmemektedir (Ramos, 2019). Kıvrımlılık ölçümünde kullanılan bir diğer yaklaşım, Temel Bileşen Analizi (PCA) ile çeşitli hesaplama tekniklerinin birlikte ele alındığı yöntemlerdir. Turior ve arkadaşları, retinal damar kıvrımlılığının değerlendirilmesine yönelik olarak, görüntülerden belirli damarlara ilişkin verilerin çıkarılmasını ve kıvrımlılık hesaplamalarının daha hızlı gerçekleştirilebilmesini amaçlayan bir yöntem önermiştir (Turior et al., 2011). Ramírez ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ise retinal damarların yerel ve global kıvrımlılık ölçütleri test edilerek bu iki hesaplama biçimi arasındaki ilişki karşılaştırılmıştır. Bu yaklaşım, sübjektif bir yorum gerektirmeksizin tamamen matematiksel ve nesnel bir değerlendirme sunmaktadır (Ramírez et al., 2025). Bir başka çalışmada ise AuxNET adı verilen ve belirlenen retinal bölgede derin öğrenme destekli kıvrımlılık puanlaması yapan bir yapı önerilmiştir (Mou et al., 2022). Ayrıca, OCTA görüntüleri kullanılarak kıvrımlılığın nicel ölçümü için küçük ölçekli eğrilik değişimlerini ve aynı zamanda genel yön değişimleri ve uzunluk-kiriş oranlarını dikkate alan bileşik ölçütler de geliştirilmiştir (Khansari et al., 2017).

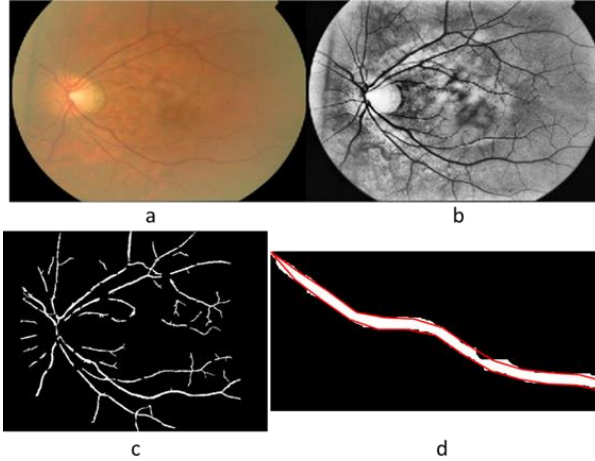
Tüm bu çalışmalar ile retinal damar eğriliklerinin doğruya yakın bir ölçüt ile temsil edilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada, retinal damar kıvrımlılığını değerlendirmek amacıyla yeni bir hesaplama tekniği geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu çalışmada, retina damar yapılarındaki geometrik değişimlerin analizi için damar kıvrımlarının açılarının ölçülüp ağırlıklandırılmasına dayalı bir yaklaşım geliştirilmiş ve ağırlıksız yöntemle karşılaştırılmıştır. Çalışmada kullanılan Aptos 2019 veri seti, diyabetik retinopatiye (DR) sahip bireylerin ve sağlıklı bireylerin retina görüntülerinden oluşmaktadır. Bu görüntüler, diyabetik retinopati varlığına göre DR ve No_DR olarak iki sınıfa ayrılmıştır. Analiz sürecinde, Temel Kıvrımlılık Skoru (TKS) ve Ağırlıklı Kıvrımlılık Skoru (AKS) yöntemleri uygulanmıştır. Ayrıca, gruplar arası farklılıkların istatistiksel anlamlılığını değerlendirmek amacıyla tek yönlü ANOVA testi uygulanmıştır. Geliştirilen bu teknik, mevcut matematiksel ölçüm yöntemlerinin güçlü yönlerini korurken, klinik uzmanların değerlendirmelerinde dikkate aldığı morfolojik faktörleri de entegre ederek daha kapsamlı ve klinik gerçeklikle uyumlu bir kıvrımlılık indeksi sunmayı amaçlamaktadır.

MATERYAL VE METOT

2.1. Görüntü Ön İşleme ve Bölütleme

Bu çalışmada, retinal fundus görüntüsü üzerinde yer alan damar parçalarının kıvrımlılık (eğrilik) analizini gerçekleştirmek amacıyla öncelikle damar yapıları, arka plandan bölütleme (segmentation) işlemiyle ayrıştırılmıştır. Bu amaçla, ham

renkli fundus görüntüleri gri seviyeye dönüştürüldükten sonra, damar-kontrastını artırmak için görüntülere art arda iki kez adaptif histogram eşitleme (CLAHE) uygulanmıştır. Böylece hem düşük kontrastlı bölgelerde damar görünürlüğü artırılmış hem de global aydınlık değişimlerinin etkisi azaltılmıştır. Kontrastı artırılmış gri seviye görüntüler, ardından adaptif eşikleme yöntemi ile ikili (siyah-beyaz) bir damar maskesine dönüştürülmüştür. Eşikleme sonrasında ortaya çıkan tekil gürültü bileşenleri ve damar kenarlarındaki istenmeyen kırılmalar, uygun yapı elemanları kullanılarak gerçekleştirilen morfolojik açma ve kapama işlemleriyle bastırılmıştır. İnce damarsal yapıların arka plandan daha net ayrılabilmesi için ek olarak beyaz top-hat ve siyah bottom-hat türü damarsal yapı artırıcı morfolojik dönüşümler uygulanmış ve damar segmentlerinin sürekliliği güçlendirilmiştir. Bölütlenmiş damar maskesi üzerinde, her bir bağımsız damar parçası Bağlı Bileşen Etiketleme (CCL) yöntemiyle tespit edilmiştir. Bu yöntem, birbirine 8-komşuluk kuralı ile bağlı olan pikselleri aynı etiket altında toplayarak her bir damar parçasını ayrı bir bileşen olarak tanımlar. Böylece, her damar segmenti bağımsız bir analiz birimi haline gelir. Her bir bileşenin sınır koordinatları, boundary fonksiyonu aracılığıyla elde edilmiştir. Sınır noktaları, damar yapısının geometrik özelliklerinin analizi için temel girdi verisini oluşturur. Elde edilen koordinatlar üzerinde belirli uzunluktaki doğru parçaları (Şekil 1.d'de kırmızı renkte gösterilmiştir) yardımıyla noktasal bir dolaşım gerçekleştirilmiştir. Bu doğru parçalarının uzunluğu, eğrilik hesaplamasının hassasiyetini belirlediğinden kısa parçalar küçük kıvrımları da yakalayabilirken, uzun parçalar bazı eğrilikleri atlayabilmektedir. Optimum uzunluk seçimiyle tüm lokal kıvrımlıkların analize dahil edilmesi sağlanmıştır. Bir retina görüntüsü üzerinde gerçekleştirilen ön işleme adımlarından bir örnek Şekil 1'de gösterilmiştir.



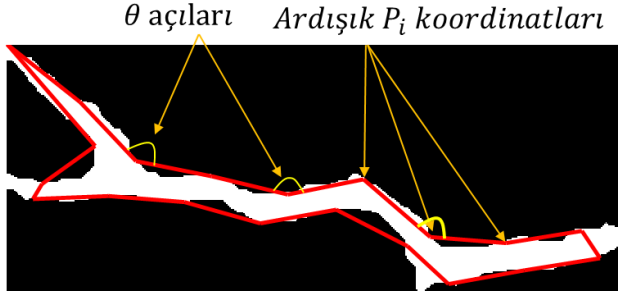
Şekil 1. (a) Orijinal retina görüntüsü, (b) Gri seviye histogram görüntüsü, (c) Segmentasyon yapılarak ayrılmış damar yapıları, (d) Uzunluk hesabı için bir damar segmentine çizilen doğru parçaları

2.2. Ağırlıklı Kıvrımlılık Skoru (AKS)

Retinal damar yapısındaki morfolojik değişikliklerin nicel değerlendirilmesinde kıvrımlılık önemli bir biyobelirteçtir. Bu çalışmada, yalnızca eğri uzunlukları değil, aynı zamanda eğriliklerin açısal şiddeti de dikkate alınarak AKS geliştirilmiştir. Her bir damar segmentinin sınır koordinatları dizisi üzerinde ardışık üçlü noktalar (P_{i-1}, P_i, P_{i+1}) kullanılarak iki ardışık damar yön vektörü arasındaki açı θ_i Eşitlik 1’de gösterildiği şekilde hesaplanır:

$$\theta_i = \cos^{-1}\left(\frac{(P_i - P_{i-1})(P_{i+1} - P_i)}{\|P_i - P_{i-1}\| \|P_{i+1} - P_i\|}\right) \quad 1$$

Bu ifade, her bir noktadaki lokal eğrilik açısını verir. Daha küçük açı değerleri daha keskin kıvrımlıkları temsil eder. Damar segmentine çizilen doğru parçaları, P_i koordinatları ve hesaplanan açıların bir temsili Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Damar segmenti, etrafındaki doğru parçaları, sınır koordinatları ve açılarının ifadesi

Elde edilen açılar $[0^\circ, 180^\circ]$ aralığındadır. Eğrilik şiddetini yansıtmak üzere Eşitlik 2’de ifade edilen ağırlık fonksiyonu tanımlanmıştır:

$$w(\theta_i) = \begin{cases} 2.00, & 0^\circ \leq \theta_i < 90^\circ; \\ 1.75, & 90^\circ \leq \theta_i < 120^\circ; \\ 1.25, & 120^\circ \leq \theta_i \leq 150^\circ \end{cases} \quad 2$$

Her damar segmenti j için ağırlıklı eğrilik skoru şu şekilde elde edilir:

$$C_j = \sum_{i=1}^{n_j} w(\theta_i) \quad 3$$

Burada n_j , j -inci damar segmentindeki eğri açı sayısını temsil eder.

Her damar segmentinin uzunluğu L_j ile ağırlıklı eğrilik katsayısı C_j çarpılarak o segmentin toplam katkısı hesaplanır. Tüm damar segmentleri üzerinden

normalize edilmiş toplam Ağırlıklı Kıvrımlılık Skoru (AKS) aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$AKS = \frac{\sum_{j=1}^m C_j L_j}{\sum_{j=1}^m L_j} \quad 4$$

2.3. Veri Seti

Bu çalışmada, Aptos 2019 veri seti kullanılmıştır. Veri seti, diyabetik retinopati (DR) hastalığına sahip bireylerin retina görüntüleri ile sağlıklı bireylere ait retina görüntülerinden oluşmaktadır. Tüm görüntüler .jpg uzantılı olup, renkli fundus fotoğrafları biçimindedir. Veri setindeki örnekler, hastalık durumuna göre iki ana sınıfa ayrılmıştır:

- Diyabetik retinopatiye sahip bireylerin retina görüntüleri “DR” (Diabetic Retinopathy) sınıfını,
- Hastalığa sahip olmayan bireylerin retina görüntüleri ise “No_DR” (Non-Diabetic Retinopathy) sınıfını temsil etmektedir.

BÜLGÜLAR

Bu bölümde, Temel Kıvrımlılık Skoru (TKS) ve Ağırlıklı Kıvrımlılık Skoru (AKS) yöntemleri kullanılarak elde edilen istatistiksel analiz sonuçları sunulmaktadır. Her iki yöntem için de DR ve No_DR sınıflarına ait 60’ar örnekten oluşan test veri setleri değerlendirilmiştir.

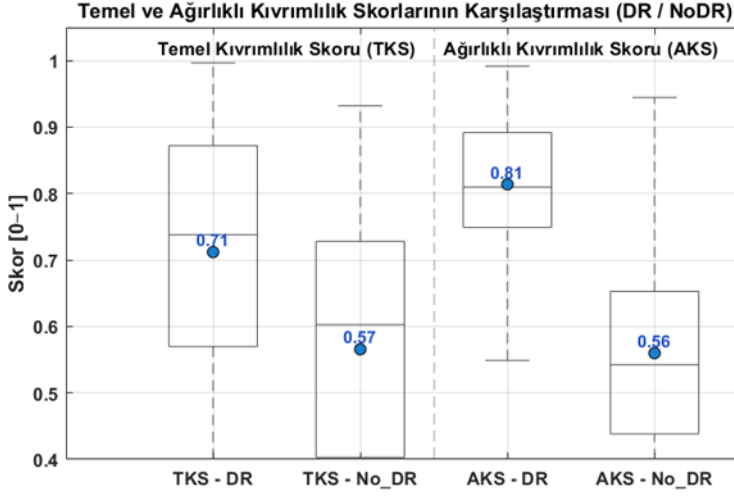
TKS ve AKS gruplarına ait istatistiksel ölçümler Tablo 1’de sunulmuştur. TKS grubunda DR ve No-DR sınıflarına ait ortalamalar birbirine oldukça yakın bulunmuş, buna karşın standart sapma ve varyans değerlerinin yüksek olması yöntemin kararsız ve dağınık bir davranış sergilediğini göstermiştir. AKS grubunda ise DR ve No-DR ortalamaları arasında belirgin bir fark gözlenmiş, varyans ve standart sapma değerlerinin düşük olması yöntemin kararlı ve tutarlı bir yapı kazandığını ortaya koymuştur.

Tablo 1. TKS ve AKS Kıvrımlılık Skorlarına Ait İstatistikler

Grup	Ortalama	Standart Sapma	Varyans
TKS-DR	0.71187	0.19205	0.036882
TKS-NoDR	0.56565	0.18603	0.034608
AKS-DR	0.81388	0.096182	0.0092509
AKS-NoDR	0.55985	0.16481	0.027162

Tablo 1’den görüldüğü üzere, TKS grubundaki ortalama değerlerin birbirine yakın olması ve varyansın yüksekliği yöntemin içsel kararsızlığını ortaya koymaktadır. AKS grubunda ise ortalamalar arasındaki fark (yaklaşık 0.20) belirgin biçimde artmış ve varyans değerleri azalmıştır. Bu durum, ağırlıklandırmanın sınıflar arasındaki ayrımı güçlendirdiğini göstermektedir.

Şekil 3’de, TKS ve AKS gruplarına ait verilerin kutu grafikleri gösterilmektedir.



Şekil 3. Temel (TKS) ve Ağırlıklı (AKS) Kıvrımlılık Skorlarına ait kutu grafikleri

Grafiklerde TKS grubuna ait kutuların geniş, iç içe geçmiş ve medyan çizgilerinin birbirine yakın olduğu; buna karşılık AKS grubundaki kutuların dar ve aralarındaki farkın belirgin olduğu gözlenmiştir. Burada, TKS’nin yüksek varyans ve düşük ayırma gücü sergilediği, AKS’nin ise kararlı ve yüksek ayırt ediciliğe sahip olduğu gözlenmiştir. Ayrıca TKS ve AKS deneysel çalışmalarında elde edilen DR ve No_DR örneklerinden elde edilen kıvrımlılık verilerine ANOVA testi uygulanmış ve veri dağılımlarının anlamlılığı incelenmiştir. Buna göre; analizin varyans değeri yani istatistiksel p-değeri TKS için 0.037, AKS için ise 0.000054 olarak hesaplanmıştır. Bu durumda AKS için DR ve No_DR için farkın çok yüksek düzeyde anlamlı olduğu, TKS için ise normal düzeyde anlamlı olduğu bilgisine ulaşılmıştır. Bu farkın oluşmasında, ağırlıklandırma işlemi ile elde edilen kıvrımlılık skorlarının kararlılığının artması etkili olmuştur. Dolayısıyla AKS, diyabetik retinopati varlığının tespitinde temel (ağırlıksız) yöntemle göre daha güvenilir sonuçlar üretmektedir.

SONUÇ

Çalışmanın temel amacı, retinal görüntülerden bölütlenerek elde edilen retina damar yapıları üzerinde kıvrımlılık değerinin daha net bir şekilde ortaya

konulabilmesi için damar eğrilik açılarının büyüklüğüne göre ağırlıklandırılması yöntemini uygulamak, bu şekilde TKS ölçütü oluşturmak ve ağırlıksız yöntemler ile geliştirilen yöntemin performansını karşılaştırmalı olarak değerlendirmektir. Bu şekilde AKS'nin istatistiksel kararlılığa olan etkisi araştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, TKS yönteminde elde edilen ortalama değerlerin birbirine yakın olduğu, standart sapma ve varyans değerlerinin ise yüksek düzeyde seyrettiği gözlemlenmiştir. Bu durum, kıvrımlılık hesabında TKS'nin tutarlılığının düşük olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, AKS yönteminde ortalama değerler arasında belirgin farklar saptanmış, varyans ve standart sapma değerleri anlamlı biçimde azalmıştır. Bu bulgu, ağırlıklandırma sürecinin verilerin tutarlılığını artırdığını ve sistemin kararlılığını istatistiksel olarak güçlendirdiğini ortaya koymuştur.

Gerçekleştirilen ANOVA testleri sonuçlarına göre, TKS grubunda DR ve No-DR sınıfları arasında anlamlı fark bulunmazken ($p > 0.05$), AKS grubunda fark yüksek anlamlılık düzeyinde tespit edilmiştir ($p < 0.001$). Bu sonuç, ağırlıklı kıvrımlılık skorlamasının, diyabetik retinopati varlığını belirlemede sınıflar arası ayrımı istatistiksel olarak güvenilir bir biçimde gerçekleştirdiğini göstermektedir.

Elde edilen sonuçlara göre, önerilen Ağırlıklı Kıvrımlılık Skoru yaklaşımı, retina damar yapılarının geometrik özelliklerindeki değişimleri daha hassas ve daha kararlı bir biçimde temsil ettiği anlaşılmıştır. Bu nedenle söz konusu yaklaşımın diyabetik retinopati tanısında temel (ağırlıksız) yöntemlere göre daha güvenli sonuçlar ürettiği değerlendirilmiştir.

KAYNAKÇA

- Abdalla, M., Hunter, A., & Al-Diri, B. (2015). Quantifying retinal blood vessels' tortuosity: Review. *2015 Science and Information Conference (SAI)*, 1023–1026. <https://doi.org/10.1109/SAI.2015.7237216>
- Appaji, A. (2019). Retinal vascular tortuosity in schizophrenia and bipolar disorder. *Schizophrenia Research*, 212, 26–32. <https://doi.org/10.1016/j.schres.2019.08.020>
- Appaji, A., Nagendra, B., Chako, D. M., Padmanabha, A., Hiremath, C. V., Jacob, A., Varambally, S., Kesavan, M., Venkatasubramanian, G., Rao, S. V., Webers, C. A. B., Berendschot, T. T. J. M., & Rao, N. P. (2019). Retinal vascular fractal dimension in bipolar disorder and schizophrenia. *Journal of Affective Disorders*, 259, 98–103. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2019.08.061>
- Atagun, M. I., Sonugur, G., Yusifova, A., Celik, I., & Ugurlu, N. (2022). Machine learning algorithms revealed distorted retinal vascular branching in individuals with bipolar disorder. *Journal of Affective Disorders*, 315, 35–41. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2022.07.060>
- Gao, Y. (2023). A narrative review of retinal vascular parameters and the applications (Part I): Measuring methods. *Brain Circulation*, 9(3), 121–128. https://doi.org/10.4103/bc.bc_8_23
- Hart, W. E., Goldbaum, M., Té, B. C., Kube, P., & Nelson, M. R. (1998). Measurement and classification of retinal vascular tortuosity. *International Journal of Medical Informatics*, 53(3), 239–252. [https://doi.org/10.1016/S1386-5056\(98\)00163-4](https://doi.org/10.1016/S1386-5056(98)00163-4)
- Khansari, M. M., O'Neill, W. D., Lim, J. I., & Shahidi, M. (2017). Method for quantitative assessment of retinal vessel tortuosity in optical coherence tomography angiography applied to sickle cell retinopathy. *Biomedical Optics Express*, 8(8), 3796–3806. <https://doi.org/10.1364/BOE.8.003796>
- Mou, L., Qi, H., Liu, Y., Zheng, Y., Matthew, P., Su, P., & Zhao, Y. (2022). Deepgrading: Deep learning grading of corneal nerve tortuosity. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 41(8), 2079–2091. <https://doi.org/10.1109/TMI.2022.3156906>
- Ramírez, N., Ralló, M., & Millán, M. S. (2025). Bridging local and global tortuosity of retinal vessels: Objective testing of index performance. *PLOS ONE*, 20(8), e0329379. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0329379>
- Ramos, L. (2019). Computational assessment of the retinal vascular tortuosity integrating domain-related information. *Scientific Reports*, 9(1), 19940. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56507-7>
- Ramos, L., Novo, J., Rauco, J., Romeo, S., & Álvarez M., D. (2018). Retinal vascular tortuosity assessment: Inter-intra expert analysis and correlation with

- computational measurements. *BMC Medical Research Methodology*, 18(1), 144. <https://doi.org/10.1186/s12874-018-0598-3>
- Song, Y. (2022). Tortuosity of branch retinal artery is more associated with the genesis and progress of diabetic retinopathy. *Frontiers in Endocrinology*, 13, 972339. <https://doi.org/10.3389/fendo.2022.972339>
- Torp, T. L. (2023). Temporal changes in retinal vascular parameters associated with successful panretinal photocoagulation in proliferative diabetic retinopathy: A prospective clinical interventional study. *Acta Ophthalmologica*, 96(4), 405–410. <https://doi.org/10.1111/aos.13617>
- Turior, R., Onkaew, D., Kondo, T., & Uyyanonvara, B. (2011). A novel approach for quantification of retinal vessel tortuosity based on principal component analysis. *8th Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Conference*, 1023–1026. <https://doi.org/10.1109/ECTICON.2011.5948017>
- Williams, O. (2015). Retinal microvascular network attenuation in Alzheimer's disease. *Alzheimer's & Dementia: Diagnosis, Assessment & Disease Monitoring*. <https://doi.org/10.1016/j.dadm.2015.04.001>

BÖLÜM 5

Biyomalzeme Uygulamalarında Yüksek Entropi Alaşımları

Nuri Ergin¹ & Zeynep Semen² & Şevval Yılmaz³ & Sude Nas Alakuş⁴

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya Türkiye, ORCID ID: 0000-0001-9025-9419

² Arş. Gör., Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya Türkiye, ORCID ID: 0000-0002-0768-3479

³ Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya Türkiye, ORCID ID: 0009-0007-7868-4536

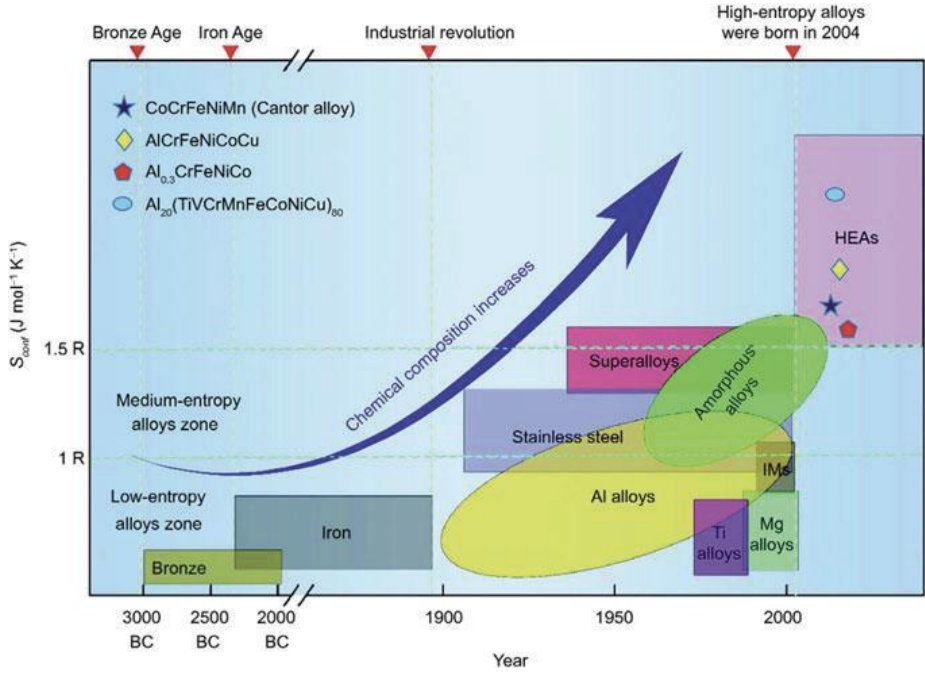
⁴ Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya Türkiye, ORCID ID: 0009-0008-1327-666X

1. Giriş

Biyomalzemeler, canlı dokularla doğrudan etkileşime giren ve biyolojik sistemlerin işlevini desteklemek, onarmak ya da değiştirmek amacıyla kullanılan malzemelerdir. Geleneksel olarak metalik, seramik, polimerik ve kompozit yapılar olarak sınıflandırılan biyomalzemeler, tıbbın birçok alanında (örneğin ortopedi, diş hekimliği, kardiyovasküler cerrahi) implant, protez veya doku mühendisliği iskeleleri şeklinde geniş uygulama alanlarına sahiptir. Ancak bu malzemelerin biyouyumluluk, mekanik dayanım ve korozyon direnci açısından istenen düzeyde performans göstermemesi, yeni nesil biyomalzeme araştırmalarını hızlandırmıştır. Bu bağlamda, yüksek entropi alaşımları (YEA) son yıllarda biyomalzeme bilimi açısından dikkat çekici bir potansiyel sergilemektedir. Bunlar arasında YEA'lar biyomedikal alanda büyük bir potansiyele sahiptir ve biyomalzeme bilimi, tıbbi teknoloji ilerledikçe ve nüfusun ihtiyaçları arttıkça klinik ve biyomedikal uygulamalarda araştırma ve inovasyonun ön saflarında yer almaya devam etmektedir. (Feng ve ark., 2022; Ratner ve ark., 2020).

1.1. Yüksek Entropi Alaşımlarının Ortaya Çıkışı

Yüksek entropi alaşımları kavramı ilk olarak 2004 yılında Yeh(2004) ve çalışma arkadaşları tarafından ortaya atılmıştır. Aynı yıl içerisinde aynı yıl Cantor ve ekibi tarafından çok bileşenli alaşım olarak adlandırılmıştır. Geleneksel alaşım sistemleri genellikle bir ana element etrafında birkaç ilave elementin alaşımlanmasıyla elde edilirken, YEA'lar yaklaşık eş atomik oranlarda beş veya daha fazla elementin bir araya getirilmesiyle oluşturulmaktadır. Bu özgün yaklaşım, karışım entropisini artırarak tek fazlı katı çözeltilerin oluşumunu teşvik etmektedir. Yüksek karışım entropisi, Gibbs serbest enerjisini azaltarak faz ayrımını engellemekte ve homojen mikroyapıların oluşumuna katkı sağlamaktadır. Böylece YEA'lar, çok bileşenli olmalarına rağmen genellikle tek fazlı YMK (Yüzey merkezli kübik), HMK (Hacim merkezli kübik) veya HSP (Hegzagonal sıkı paket) yapılar sergilemektedir. Şekil 1'de, insanlığın yaklaşık son 10.000 yıl boyunca kullandığı malzemelere ilişkin geniş bir panorama sunulmakta olup, yüksek entropili alaşımların geliştirilmesine kadar geçen süreçte seramiklerden metallere, polimerlerden kompozitlere uzanan çeşitli malzeme türlerinin tarihsel gelişimi gösterilmektedir. (Miracle & Senkov, 2017; Zhang ve ark., 2014).



Şekil 1. Entropi esaslı malzeme kullanımının tarihsel süreçteki dönüşümü (Miracle & Senkov, 2017)

Bu konsept, malzeme mühendisliğinde bir paradigma değişimi oluşturmuştur. Zira YEA'lar yalnızca yüksek mukavemet ve sertlikleriyle değil, aynı zamanda olağanüstü tokluk, aşınma ve korozyon dirençleriyle de öne çıkmaktadır. Bu özellikler, biyomedikal implantların uzun süreli dayanıklılığı ve biyolojik ortamlarda kararlılığı açısından son derece önemlidir (Cantor et al., 2004; Miracle & Senkov, 2017).

1.2. Yüksek Entropi Alaşımlarının Biyomalzeme Alanındaki Yükselişi

Son yıllarda yapılan çalışmalar, YEA'ların yalnızca yapısal malzeme olarak değil, aynı zamanda biyomalzeme olarak da büyük potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle Ti, Zr, Nb, Ta ve Hf gibi biyoyumlu elementlerin kombinasyonlarıyla elde edilen YEA sistemleri, klasik titanyum alaşımlarına alternatif oluşturabilecek özellikler sergilemektedir. Bu alaşımlar; yüksek korozyon direnci, kontrollü elastik modül, mükemmel biyoyumluluk ve sitotoksite açısından güvenli bileşimleri sayesinde, ortopedik ve dental implant uygulamalarında gelecek vaat etmektedir.

Yüksek entropi alaşımlarının biyomalzeme olarak cazip hale gelmesinin başlıca nedenleri:

- Korozyon Direnci: Biyolojik ortamlarda (örneğin fizyolojik tuz çözeltilerinde) yüksek kararlılık sergilemeleri.
- Mekanik Özellikler: Yüksek sertlik ve mukavemetin yanı sıra, uygun elastik modül değerleri sayesinde kemik dokusuyla daha iyi mekanik uyum sağlamaları.
- Biyouyumluluk: Nikel, krom ve kobalt gibi potansiyel alerjenik elementlerden arındırılmış bileşimlerin tercih edilebilmesi.
- Yüzey Modifikasyonuna Uygunluk: Yüzey pürüzlülüğü, oksit tabaka oluşumu ve hidroksiapatit kaplama gibi biyouyumlu yüzey mühendisliği uygulamalarıyla kolay entegre edilebilmeleri (Yang ve ark., 2022).

1.3. Geleneksel Biyometalik Malzemelerle Karşılaştırma

Geleneksel metalik biyomalzemeler arasında paslanmaz çelik, Co–Cr alaşımları ve Ti–6Al–4V alaşımı öne çıkmaktadır. Ancak bu alaşımlar belirli dezavantajlar taşır:

- Paslanmaz çelikler (ör. 316L) yüksek elastik modül farkı nedeniyle stres kalkımı etkisine neden olmaktadır
- Co–Cr alaşımları mükemmel mekanik dayanım sağlasa da, Co ve Cr iyonlarının biyolojik ortama salınımı sitotoksikite ve alerjik reaksiyon riskini artırmaktadır.
- Ti–6Al–4V alaşımı biyouyumlu kabul edilse de, Al ve V elementlerinin uzun vadeli toksik etkileri tartışılmaktadır.

Buna karşın, TiZrNbTa, TiZrHfNb ve TiNbZrMo gibi YEA sistemleri, bu dezavantajların çoğunu ortadan kaldırmaktadır. Örneğin TiZrNbTa YEA, elastik modül açısından kortikal kemiğe oldukça yakın (~60–80 GPa) bir değer sunarken, aynı zamanda yüksek korozyon direnci ve biyouyumluluk göstermektedir. Bu nedenle, YEA’lar yalnızca mevcut malzemelerin yerini almakla kalmayıp, biyomalzeme tasarımında yeni bir nesil oluşturma potansiyeline sahiptir (De Oliveira ve ark., 2022).

1.4. Biyomalzeme Tasarımında YEA Yaklaşımının Felsefesi

Yüksek entropi alaşımlarının biyomalzeme olarak kullanılmasının ardındaki temel yaklaşım, malzeme tasarımının istatistiksel ve termodinamik ilkelerle yeniden tanımlanmasıdır. Klasik alaşımlar “bir ana element + takviye element” paradigmasıyla oluşturulurken, YEA’lar “çok bileşenli rastgele karışım” felsefesine dayanır. Bu yaklaşım, olası bileşim uzayını muazzam ölçüde

genişleterek, belirli fonksiyonel hedeflere (ör. düşük elastik modül, yüksek biyoyoumluluk, pasivasyon eğilimi) göre optimize edilmiş yeni alaşımların keşfini kolaylaştırır (Miracle & Senkov, 2017).

Ayrıca, yapay zekâ destekli malzeme keşfi ve hesaplamalı termodinamik (CALPHAD) yöntemleri, YEA'ların biyomalzeme olarak tasarımında önemli rol oynamaktadır. Bu sayede, deneysel deneme-yanılma süreci azaltılmakta ve hedeflenen biyomedikal özelliklere sahip yeni alaşım sistemlerinin geliştirilmesi hızlanmaktadır (Xie ve ark., 2025).

2. Biyomalzeme Bilimi Açısından YEA'ların Önemi

Biyomalzeme bilimi, bir malzemenin biyolojik sistemlerle etkileşimini anlamayı ve bu etkileşimden doğan fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçleri kontrol altına almayı amaçlar. Bu bağlamda, bir malzemenin biyomedikal amaçla kullanılabilmesi için biyoyoumluluk, korozyon direnci, mekanik dayanım ve biyolojik stabilite gibi temel kriterleri sağlaması gerekmektedir (Ratner et al., 2020).

Yüksek entropi alaşımları (YEA'lar), bu kriterleri karşılamakla kalmayıp, aynı zamanda çok bileşenli doğaları sayesinde yeni tasarım özgürlükleri sunmalarıyla biyomalzeme bilimi açısından devrim niteliğinde bir potansiyel taşır. Geleneksel biyometalik malzemelere kıyasla, YEA'ların çok fazlı yapısı ve entropi etkili kararlılığı, hem fiziksel hem de biyolojik açıdan üstün performans sağlamaktadır.

2.1. Mekanik Özellikler: Kemik Dokusu ile Uyumlu Malzeme Tasarımı

Biyomalzemelerde mekanik uyum, özellikle ortopedik ve dental implant uygulamalarında kritik öneme sahiptir. Kemik dokusunun elastik modülü yaklaşık 10–40 GPa aralığındadır; buna karşılık paslanmaz çelik (200 GPa) ve Co–Cr alaşımları (240 GPa) gibi geleneksel malzemeler kemikten çok daha serttir. Bu durum “stres kalkanı etkisi (stress shielding)” olarak bilinen olumsuz bir olguya yol açmaktadır.

YEA'lar bu sorunu önemli ölçüde azaltabilir. Özellikle Ti–Zr–Nb–Ta ve Ti–Zr–Hf–Nb gibi biyoyoumlu elementlerden oluşan sistemler, 60–90 GPa civarında elastik modül sergileyerek kemik dokusuna oldukça yakın değerler elde eder. Bu, yük transferini daha homojen hale getirir ve implant çevresindeki kemik rezorpsiyon riskini azaltır. Bununla birlikte, YEA'lar yüksek mukavemet (800–1500 MPa aralığında çekme dayanımı) ve iyi süneklik kombinasyonu sayesinde deformasyon altında kırılmadan enerji soğurabilirler. Bu özellik, özellikle ağırlık taşıyan implantlarda (örneğin femoral baş protezleri, omurga sabitleme sistemleri) mekanik güvenlik açısından büyük avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, YEA'ların yüksek dislokasyon yoğunluğu ve kararlı faz yapıları sayesinde yorulma dayanımları da yüksektir. Çalışmalar, CoCrFeNiMn YEA sistemlerinin geleneksel paslanmaz çeliklere kıyasla çok daha yüksek döngü ömrü sunduğunu

göstermektedir. Bu özellik, vücut içi implantların uzun vadeli güvenilirliği açısından kritik bir faktördür (Hemphill ve ark., 2015; Lv. ve ark., 2025).

2.2. Korozyon Direnci ve Pasif Film Oluşumu

Bir biyomalzemenin vücut ortamında kararlı kalabilmesi için korozyon direnci büyük önem taşımaktadır. Fizyolojik ortamlarda (örneğin NaCl içeren serum veya vücut sıvıları) metal iyonlarının salınımı hem mekanik bütünlüğü hem de biyolojik güvenliği tehdit etmektedir. YEA'ların çok bileşenli yapısı, karma oksit tabakalarının oluşumunu teşvik etmekte, oluşan bu oksit tabakaları (örneğin TiO_2 , ZrO_2 , Nb_2O_5 , Ta_2O_5), pasif koruma sağlayarak metal iyonlarının salınımını engellemektedir. Özellikle TiZrNbTa YEA sistemi, Ti-6Al-4V alaşımına kıyasla hem daha yüksek pasivasyon potansiyeli hem de daha düşük akım yoğunluğu sergilemektedir. Korozyon direncindeki bu artış, “entropi kararlılığı” olgusuyla ilişkilidir. Çok sayıda elementin rastgele dağılımı, difüzyon kinetiğini yavaşlatır ve elementlerin seçici çözünmesini engeller. Ayrıca, YEA yüzeylerinde oluşan oksit filmlerin çok bileşenli doğası, pH ve sıcaklık değişimlerine karşı daha dayanıklı pasivasyon tabakaları oluşturmaktadır. Biyomalzeme tasarımında bu özellik, implantın ömrünü uzattığı gibi, doku çevresinde iyonik toksisite riskini de önemli ölçüde azaltmaktadır ((Zhang et al., 2014; Miracle & Senkov, 2017).

2.3. Biyouyumluluk ve Sitotoksisite

Biyouyumluluk, bir malzemenin canlı sistemle etkileşiminde toksik, immünolojik veya inflamatuvar reaksiyonlara yol açmadan görevini sürdürebilme kapasitesidir. YEA'ların biyouyumluluğu, seçilen elementlerin kimyasal doğasına bağlıdır. Biyomedikal amaçla geliştirilen YEA sistemlerinde genellikle Ti, Zr, Nb, Ta, Hf gibi biyouyumlu elementler tercih edilmektedir. Bu elementler oksit tabaka oluşturarak hücre adezyonunu kolaylaştırır ve sitotoksik iyon salınımını önler. Buna karşın Cr, Ni, Co gibi elementlerin varlığı biyouyumluluğu olumsuz etkileyebilir; bu nedenle modern YEA biyomalzemeleri genellikle “Ni- and Cr-free” olarak tasarlanmaktadır. In vitro hücre kültürü çalışmalarında, TiZrNbTa YEA yüzeylerinde osteoblast hücrelerinin (MG-63) yüksek proliferasyon oranları gözlenmiştir. Ayrıca, bu alaşımlar hücre morfolojisini ve adezyon proteinlerinin (örneğin fibronectin, vinculin) ekspresyonunu destekleyerek osteojenik farklılaşmayı teşvik etmektedir. Sitotoksisite testleri (örneğin MTT, Live/Dead boyama) sonuçları, YEA yüzeylerinin titanyum alaşımlarına eşdeğer veya daha yüksek biyouyumluluk gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu bulgular, YEA'ların biyomedikal implant malzemesi olarak güvenle kullanılabileceğini desteklemektedir (Iijima ve ark., 2021).

2.4. Yüzey Özellikleri ve Hücre Etkileşimi

Biyomalzeme yüzey özellikleri —özellikle pürüzlülük, yüzey enerjisi ve oksit tabakası kompozisyonu— hücre adezyonu ve doku entegrasyonu üzerinde

belirleyici rol oynamaktadır. YEA yüzeylerinin çok elementli doğası, oksit tabakalarının bileşimsel çeşitliliğini artırır ve bu durum biyolojik hücrelerin davranışını olumlu yönde etkileyebilir. Örneğin, TiZrNbTa YEA yüzeylerinde yapılan XPS analizleri, yüzeyin çok katmanlı oksitlerden oluştuğunu (TiO_2 , Nb_2O_5 , Ta_2O_5) göstermiştir. Bu oksitlerin kombinasyonu, yüzeyde hidrofilik karakterin artmasına yol açar; böylece protein adsorpsiyonu ve hücre adezyonu kolaylaşır. Ayrıca, yüzey mühendisliği yöntemleriyle (örneğin anodizasyon, lazer yüzey işleme veya hidroksiapatit kaplama) YEA yüzeyleri modifiye edilerek biyoyumluluk daha da artırılabilir. Bu tür modifikasyonlar, osteointegrasyon sürecini hızlandırarak implantın çevre dokuya entegrasyonunu desteklemektedir.

2.5. Biyomalzeme Olarak YEA’ların Sürdürülebilirliği ve Uyarlanabilirliği

YEA’ların bir diğer önemli avantajı, bileşim esnekliğidir. Geleneksel alaşımlarda küçük element değişimleri dahi faz kararlılığını bozabilirken, YEA’larda geniş bileşim aralıkları kararlılıkla korunabilir. Bu özellik, farklı biyolojik ve mekanik gereksinimlere göre malzeme tasarımını kolaylaştırır. Ayrıca, YEA’lar sürdürülebilirlik açısından da dikkat çekicidir. Nikel, krom gibi toksik elementlerin dışlanması, çevre dostu üretim süreçlerinin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu durum, biyomalzeme üretiminde yeşil mühendislik prensiplerinin uygulanmasını destekler niteliktedir (Miracle & Senkov, 2017).

2.6. Klinik Perspektiften Önemi

Klinik düzeyde bakıldığında, yüksek entropi alaşımlarının potansiyeli yalnızca malzeme dayanımıyla sınırlı değildir. YEA implantlar, uzun ömürlü, biyoyumlu ve kişiselleştirilebilir özellikleri sayesinde gelecekte ortopedi, diş hekimliği ve kardiyovasküler cerrahi alanlarında devrim yaratabilecek niteliktedir. Özellikle eklemli imalat (3D baskı) teknolojileriyle entegre edildiğinde, hastaya özel YEA implantların üretimi mümkün hale gelmektedir. Bu, biyomalzeme bilimi ile dijital tıp arasındaki entegrasyonun önünü açmaktadır.

3. Biyomedikal Uygulamalarda YEA Sistemleri

Yüksek entropi alaşımlarının (YEA’ların) biyomedikal uygulamadaki potansiyeli, çok bileşenli doğalarından kaynaklanan özelleştirilebilir mekanik, kimyasal ve biyolojik özelliklerinden ileri gelmektedir. YEA’lar, geleneksel biyometalik malzemelerin (örneğin Ti-6Al-4V, Co-Cr, 316L paslanmaz çelik) sınırlamalarını aşabilecek yeni bir malzeme platformu sunmaktadır. Özellikle biyoyumlu elementlerden (Ti, Zr, Nb, Ta, Hf) oluşturulan YEA sistemleri, implant malzemeleri olarak yüksek performans sergilemektedir.

3.1. Ortopedik İmplant Uygulamaları

Ortopedik implantlar (örneğin kalça protezleri, plak-vida sistemleri ve omurga sabitleyiciler), yüksek mekanik dayanım, düşük elastik modül ve mükemmel biyouyumluluk gerektirir. Geleneksel Ti-6Al-4V alaşımı bu alanda yaygın olarak kullanılsa da, alüminyum ve vanadyumun biyolojik toksisitesi ve stres kalkanı etkisi önemli sınırlamalardır. Yüksek entropi alaşımları bu sorunlara çözüm sunmaktadır. Özellikle TiZrNbTa ve TiZrHfNb sistemleri, hem yüksek mekanik performans hem de düşük elastik modül değerleri (60–80 GPa) sayesinde kemik dokusuyla daha uyumludur. Bu alaşımların mikroyapısında oluşan TiO₂, Nb₂O₅ ve Ta₂O₅ oksitleri, yüzeyde pasif koruma sağlar ve hücre adezyonunu destekler.

TiZrNbTa YEA:

Çekme dayanımı: ~900 MPa

Elastik modül: ~70 GPa

Korozyon potansiyeli (E_{corr}): +0.18 V (Ti-6Al-4V'den daha yüksek)

Hücre canlılığı (MG-63 osteoblast): %95 üzeri

Bu veriler, TiZrNbTa YEA'nın ortopedik implantlarda kemik entegrasyonunu destekleyen, toksik etkisi bulunmayan bir aday olduğunu göstermektedir. Ek olarak, YEA'lar additif imalat (3D baskı) teknolojileriyle kolayca şekillendirilebilir. Bu durum, hasta anatomisine özel, gözenekli implant yapıların üretimini mümkün kılar. Gözenekli yapı, kemik hücrelerinin büyümesini ve damarlaşmayı kolaylaştırarak osteointegrasyonu hızlandırmaktadır.

3.2. Diş Hekimliği Uygulamaları

Dental implantlar, yüksek estetik gereksinimler ve ağız ortamında meydana gelen karmaşık kimyasal etkileşimler nedeniyle benzersiz malzeme özellikleri gerektirir. Bu ortamlarda aşınma direnci, tükürük kaynaklı korozyon kararlılığı ve biyofilm oluşumuna karşı direnç kritik parametrelerdir (Ratner et al., 2020). CoCrFeNiTi ve TiZrHfNbTa sistemleri, diş implantlarında kullanılmak üzere araştırılmış YEA örnekleridir. Bu sistemlerde, Ti ve Zr'nin biyouyumluluğu ile Co ve Cr'nin mekanik dayanım katkısı dengelenmeye çalışılır. Ancak son dönemde Ni ve Cr içermeyen YEA'lar, alerjenik etkiler nedeniyle daha çok tercih edilmektedir.

TiZrNbTa YEA'ların diş implantı olarak avantajları:

Asidik tükürük ortamında düşük iyon salınımı,

Yüksek yüzey sertliği (yaklaşık 4.5 GPa nano-süreçte),

Bakteriyel adezyonun azalması,

Yüksek yüzey hidrofilikliği ($WCA \approx 50-60^\circ$).

Bu özellikler, YEA'ları dental implantlarda uzun ömürlü, biyouyumlu alternatifler haline getirmektedir.

3.3. Kardiyovasküler Uygulamalar: Damar Stentleri ve Kalp Cihazları

Kardiyovasküler implantlarda (örneğin stent, kalp kapakçığı destek halkaları, pacemaker elektrotları) malzemenin elektrokimyasal kararlılığı, manyetik geçirgenliği ve biyouyumluluğu belirleyici öneme sahiptir. Nikel ve krom içeren alaşımlar (ör. NiTi, 316L çelik) nikel alerjisi ve iyon salınımı nedeniyle sınırlı biyouyumluluk sergilemektedir. Bu bağlamda, Ni-free YEA sistemleri (ör. TiZrNbTa, TiNbZrMo) kardiyovasküler uygulamalar için umut verici alternatiflerdir. Bu alaşımlar, yüksek korozyon direncinin yanı sıra kanla temas eden yüzeylerde düşük hemolitik etki göstermektedir. Ek olarak, YEA'ların manyetik geçirgenlikleri genellikle düşüktür; bu da manyetik rezonans görüntüleme (MRI) sırasında artefakt oluşumunu azaltır — bu özellik özellikle stent malzemeleri için klinik olarak değerlidir. Yüzey modifikasyonlarıyla (ör. TiN, DLC veya hidroksiapatit kaplamalar) YEA stentlerinin trombosit adezyonunu ve kan pıhtılaşma eğilimini azaltmak mümkündür. Böylece, kanla temas eden yüzeylerde hemokompatibilite artırılmaktadır.

3.4. Doku Mühendisliği ve Gözenekli Yapılar

Doku mühendisliğinde kullanılan iskele malzemeleri, hücre büyümesi, adezyonu ve doku rejenerasyonunu desteklemelidir. Bu amaçla kullanılan malzemelerde yüksek yüzey alanı, gözeneklilik ve biyouyumluluk önem taşımaktadır. Gözenekli YEA yapılar, özellikle additif imalat veya toz metalurjisi teknikleriyle üretilerek doku mühendisliği iskeleleri için uygun hale getirilebilir. Bu yapılar, hem mekanik dayanımı koruyup hem de gözenek çapını (100–500 μm) kontrollü biçimde optimize ederek osteoblast hücre büyümesini teşvik etmektedir. Ayrıca, YEA yüzeylerinde hidroksiapatit (HA) veya biyokimyasal ajanlarla (ör. kollajen, peptitler) yapılan modifikasyonlar, hücre–malzeme etkileşimini artırarak osteojenik farklılaşmayı destekler. Bu durum, kemik rejenerasyonu ve implant–kemik entegrasyonu süreçlerinde kritik rol oynamaktadır.

3.5. Antibakteriyel ve Fonksiyonel YEA'lar

Biyomedikal alanda geleceğe yönelik bir diğer ilgi çekici yönelim, fonksiyonel YEA tasarımıdır. Bazı YEA sistemleri (ör. Cu içerikli alaşımlar) doğal antibakteriyel özellikler gösterebilir. Cu elementinin yüzeyde kontrollü oksitlenmesi, bakteri hücre duvarlarını tahrip ederek enfeksiyon riskini azaltmaktadır. Ayrıca, Ag, Zn veya Mg gibi elementlerin küçük oranlarda eklenmesiyle biyofonksiyonel YEA'lar geliştirilmektedir. Bu sistemler, hem hücre dostu hem de antibakteriyel davranış sergileyebilir. Örneğin, TiZrNbTa–Ag YEA'larda Ag ilavesi, bakteriyel inhibisyon oranını %98'e kadar artırırken,

osteoblast hücre canlılığı üzerinde olumsuz bir etki yaratmamaktadır. Bu tür tasarımlar, özellikle enfeksiyon riski yüksek ortopedik ve dental implantlarda geleceğin akıllı biyomalzeme konseptini temsil etmektedir.

3.6. Klinik Uygulamalarda Karşılaşılan Zorluklar

Her ne kadar YEA'lar biyomalzeme olarak büyük potansiyel taşısa da, klinik uygulamalara geçiş sürecinde bazı zorluklar bulunmaktadır:

- Uzun dönem biyostabilite verilerinin eksikliği: Özellikle iyon salınımı ve inflamatuvar tepkiler uzun vadede daha fazla çalışmaya ihtiyaç duymaktadır.
- Üretim maliyeti: Refrakter elementlerin (Nb, Ta, Hf) maliyeti yüksektir.
- İşlenebilirlik: YEA'ların yüksek sertliği nedeniyle işlenmesi zor olabilir.
- Regülasyon eksikliği: Henüz FDA veya ISO tarafından YEA bazlı implantlar için spesifik standartlar bulunmamaktadır.

Bu nedenlerle, akademik araştırmalardan klinik uygulamalara geçiş süreci dikkatle planlanmalıdır (Miracle & Senkov, 2017).

4. Karşılaşılan Zorluklar ve Geleceğe Yönelik Perspektifler

Yüksek entropi alaşımları (YEA'lar), malzeme biliminin en yenilikçi ve çok yönlü yaklaşımlarından birini temsil etmektedir. Biyomalzeme alanında YEA'ların sunduğu benzersiz faz kararlılığı, kimyasal çeşitlilik ve biyouyumlu element kombinasyonları, onları geleceğin implant malzemeleri arasında ön plana çıkarmaktadır. Ancak bu umut verici potansiyele karşın, YEA'ların tıpta geniş ölçekli kullanımı hâlâ erken araştırma aşamasındadır. Bu durum, hem bilimsel hem de endüstriyel düzeyde çeşitli zorlukların aşılmasını gerektirir.

4.1. Üretim ve İşlenebilirlik Sorunları

YEA'ların biyomedikal uygulamalardaki en önemli teknik zorluklarından biri, üretim sürecinin karmaşıklığı ve maliyetidir. Bu alaşımlar genellikle yüksek saflıkta elementlerin kontrollü oranlarda karıştırılmasını gerektirir. Özellikle Ti, Nb, Ta ve Hf gibi refrakter elementler yüksek ergime sıcaklıklarına sahiptir (>2000 °C). Bu durum, klasik döküm veya ergitme tekniklerinde enerji tüketimini artırır. Toz metalurjisi, mekanik alaşımlama, ergitme-yeniden ergitme ve additif imalat gibi alternatif üretim yöntemleri bu zorluğu kısmen azaltmakta, ancak yüzey homojenliği ve faz kontrolü hâlâ sınırlayıcı faktörlerdir. Ayrıca, YEA'ların yüksek sertliği işlenebilirliği zorlaştırır. Bu nedenle, implant tasarımlarında son şekillendirme işlemleri (örneğin delme, diş açma, polisaj) karmaşık hale gelir. Bu zorlukların aşılması, yeni nesil üretim stratejilerinin

(örneğin lazer tabanlı seçici ergitme, yönlendirilmiş enerji biriktirme) yaygınlaşmasıyla mümkün olacaktır (Miracle & Senkov, 2017).

4.2. Mekanik ve Kimyasal Özelliklerin Standardizasyonu

YEA'ların mekanik ve kimyasal özellikleri, bileşimdeki elementlerin oranına, üretim yöntemine ve ısıtma işlemine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bu durum, biyomalzeme uygulamaları için gerekli olan standardizasyon sürecini karmaşıklştırmaktadır. Örneğin TiZrNbTa YEA'nın elastik modülü 65–90 GPa aralığında ölçülürken, farklı üretim yöntemleri (ergitme vs. lazer ergitme) bu değeri %20'ye kadar değiştirebilmektedir. Aynı durum korozyon direnci ve yüzey pürüzlülüğü için de geçerlidir. Dolayısıyla, YEA biyomalzemeleri için uluslararası standardizasyon protokollerinin (ör. ASTM veya ISO) oluşturulması gereklidir. Bu standartlar; üretim parametreleri, yüzey hazırlama yöntemleri, in vitro test protokolleri ve in vivo validasyon süreçlerini kapsamalıdır. Ancak hâlihazırda YEA'lar için spesifik bir biyomedikal malzeme standardı mevcut değildir (Olorundaisi ve ark., 2025).

4.3. Uzun Dönem Biyostabilite ve Güvenlik Eksikliği

Biyomalzeme olarak kullanılan YEA'ların çoğu henüz uzun dönem biyostabilite açısından yeterince incelenmemiştir. Laboratuvar ortamındaki (in vitro) testler, genellikle 1–4 haftalık periyotlarda yapılırken, gerçek klinik implant ömrü 10–20 yıl arasında olabilir. Bu nedenle, uzun süreli iyon salınımı, oksit tabaka bozulması, biyolojik yaşlanma ve inflamatuvar yanıtlar hakkında yeterli veri bulunmamaktadır. Ayrıca, YEA yüzeylerinin oksit tabakası zamanla yeniden yapılabilir; bu yeniden yapılandırma, doku–implant ara yüzeyinde farklı iyonik kompozisyonlar yaratabilir. Bu durum, mikro-galvanik korozyon veya yerel pH değişimleri yoluyla doku reaksiyonlarını etkileyebilir. Bu nedenle gelecekte, uzun süreli in vivo modeller ve hızlandırılmış yaşlandırma testleri geliştirilmelidir. Özellikle iyon salınımının biyolojik kümülatif etkileri (ör. Nb veya Ta iyonlarının kemik hücre metabolizmasına etkisi) daha derinlemesine incelenmelidir (Ahmady ve ark., 2023).

4.4. Biyolojik Karmaşıklık: Hücre–İyon Etkileşimlerinin Anlaşılması

YEA'ların çok elementli doğası, biyolojik sistemlerle etkileşimlerini öngörmeyi zorlaştırır. Farklı elementlerin yüzeyde oluşturduğu karma oksit tabakaları, hücre zarındaki reseptörlerle farklı şekilde etkileşebilir. Örneğin, TiO₂ yüzeyleri osteoblast farklılaşmasını desteklerken, ZrO₂ ve Nb₂O₅ yüzeyleri fibroblast proliferasyonunu etkileyebilir. Bu durum, YEA'larda element sinerjisi kavramının biyolojik düzeyde anlaşılmasını gerektirir. Mevcut literatürde genellikle tek bileşenli biyoyumluluk değerlendirmeleri yapılmakta, çok bileşenli sistemlerin kombine etkileri yeterince modellenmemektedir. Gelecekte, biyoinformatik modelleme ve moleküler dinamik simülasyonları, YEA–biyosistem etkileşimlerini öngörmek için güçlü araçlar olarak kullanılabilir. Bu

sayede, hedefe yönelik “biyolojik olarak optimize edilmiş YEA tasarımı” mümkün olacaktır.

4.5. Ekonomik ve Endüstriyel Zorluklar

Refrakter elementlerin yüksek maliyeti, YEA üretiminde ekonomik kısıtlamalar yaratmaktadır. Özellikle tıbbi sınıf Ta, Nb ve Hf elementleri oldukça pahalıdır. Bu durum, geniş ölçekli implant üretimini maliyet açısından zorlaştırır. Ayrıca, YEA’ların geri dönüşümü ve yeniden işlenmesi henüz yaygın değildir. Karışık bileşimleri nedeniyle hurda malzeme geri kazanımı karmaşıktır. Bu nedenle, gelecekte düşük maliyetli ve çevre dostu YEA sistemleri (ör. Ti–Zr–Fe–Mn tabanlı) üzerine odaklanılması gerekmektedir. Endüstriyel ölçekte başarı, yalnızca malzemenin performansına değil, aynı zamanda üretim zincirinin sürdürülebilirliğine de bağlı olacaktır (Miracle & Senkov, 2017).

4.6. Regülasyon ve Klinik Onay Süreci

Şu anda, yüksek entropi alaşımlarına dayalı hiçbir implant FDA (U.S. Food and Drug Administration) veya EMA (European Medicines Agency) tarafından resmi olarak onaylanmamıştır. Bunun nedeni, bu malzemelerin yeni bir sınıf oluşturması ve uzun dönem klinik verilerin eksikliğidir.

Gelecekte klinik onay sürecinin hızlanması için şu adımlar gereklidir:

- Standardize edilmiş toksikoloji ve biyouyumluluk test protokolleri (ISO 10993 serisiyle uyumlu).
- Pilot ölçekli klinik öncesi çalışmalar: Hayvan modellerinde 12–24 aylık implant testleri.
- Regülasyon altyapısının genişletilmesi: YEA’lar için özel sertifikasyon kriterleri oluşturulması.

Bu adımlar, akademik araştırmalardan klinik uygulamalara geçişi hızlandıracaktır.

4.7. Geleceğe Yönelik Araştırma Perspektifleri

Yüksek entropi alaşımlarının biyomalzeme olarak geleceği, disiplinler arası bir yaklaşıma bağlıdır. Önümüzdeki araştırma yönelimleri şu alanlarda yoğunlaşmaktadır:

4.7.1. Biyofonksiyonel YEA Tasarımı

YEA sistemlerine Mg, Zn, Cu veya Ag gibi elementlerin düşük oranlarda eklenmesiyle antibakteriyel, osteoindüktif veya anjiyojenik özellik kazandırılabilir. Bu sayede implantlar yalnızca pasif değil, aktif biyolojik işlevler de kazanır.

4.7.2. Akıllı Yüzeyler ve Uyarlanabilir Malzemeler

Akıllı YEA yüzeyleri, pH veya sıcaklık gibi çevresel uyarıcılara yanıt verebilen “akıllı kaplamalar” geliştirmek için kullanılabilir. Böylece, enfeksiyon veya inflamasyon durumunda yüzey iyon salınımını dinamik olarak değiştiren implantlar üretilebilir.

4.7.3. Nano-ölçekli YEA İnce Filmler

Katmanlı veya nanokompozit YEA kaplamalar, minimal invaziv tıbbi cihazlarda (ör. stentler, mikroelektrotlar) kullanılabilir. Bu sistemler hem mekanik hem elektrokimyasal olarak üstün performans sergilemektedir.

4.7.4. Hesaplamalı Malzeme Bilimi ve Yapay Zekâ

“High-throughput computation” ve yapay zekâ destekli malzeme keşfi, yeni biyoyumlu YEA bileşimlerinin öngörülmesini kolaylaştıracaktır. Bu yöntemlerle, binlerce olası bileşimden biyoyumluluk ve mekanik denge açısından en uygun kombinasyonlar hızla seçilebilir (Miracle & Senkov, 2017).

4.7.5. Kişiselleştirilmiş İmplantlar

Additif imalat (3D baskı) teknolojileriyle hasta anatomisine özgü YEA implantlar üretmek mümkün hale gelmektedir. Bu, gelecekte kişiye özel biyomalzeme mühendisliği kavramını gerçeğe dönüştürecektir.

KAYNAKÇA

- Ahmady, A. R., Ekhlesi, A., Nouri, A., Nazarpak, M. H., Gong, P., & Solouk, A. (2023). High entropy alloy coatings for biomedical applications: A review. *Smart Materials in Manufacturing*, 1, 100009.
- Cantor, B., Chang, I. T., Knight, P., & Vincent, A. J. B. (2004). Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 375, 213-218.
- De Oliveira, T. G., Fagundes, D. V., Capellato, P., Sachs, D., & da Silva, A. A. A. P. (2022). A Review of Biomaterials Based on High-Entropy Alloys. *Metals* 2022, 12, 1940.
- Feng, J., Tang, Y., Liu, J., Zhang, P., Liu, C., & Wang, L. (2022). Bio-high entropy alloys: Progress, challenges, and opportunities. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 977282.
- Hemphill, M. A., Yuan, T., Wang, G. Y., Yeh, J. W., Tsai, C. W., Chuang, A., & Liaw, P. K. (2012). Fatigue behavior of Al_{0.5}CoCrCuFeNi high entropy alloys. *Acta Materialia*, 60(16), 5723-5734.
- Iijima, Y., Nagase, T., Matsugaki, A., Wang, P., Ameyama, K., & Nakano, T. (2021). Design and development of Ti–Zr–Hf–Nb–Ta–Mo high-entropy alloys for metallic biomaterials. *Materials & Design*, 202, 109548.
- Lv, L., Dong, C., Ma, J., Yang, Z., Hu, M., & Wei, X. (2025). Recent advances in high-entropy alloys for biomedical applications. *Materials & Design*, 114721.
- Miracle, D. B., & Senkov, O. N. (2017). A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta materialia*, 122, 448-511.
- Olorundaisi, E., & Olubambi, P. A. (2025). The prospect and limitation of high entropy alloy as 4th industrial material. *Materials Today Sustainability*, 31, 101163.
- Ratner, B. D., Hoffman, A. S., Schoen, F. J., Lemons, J. E., Wagner, W. R., Sakiyama-Elbert, S. E., ... & Yaszemski, M. J. (2020). Introduction—biomaterials science: an evolving, multidisciplinary endeavor. *Biomaterials science: an introduction to materials in medicine*, 3-19.
- Xie, E., & Yang, C. (2025). AI Design for High Entropy Alloys: Progress, Challenges and Future Prospects. *Metals*, 15(9), 1012.
- Yang, W., Pang, S., Liu, Y., Wang, Q., Liaw, P. K., & Zhang, T. (2022). Design and properties of novel Ti–Zr–Hf–Nb–Ta high-entropy alloys for biomedical applications. *Intermetallics*, 141, 107421.
- Yeh, J. W., Chen, S. K., Lin, S. J., Gan, J. Y., Chin, T. S., Shun, T. T., ... & Chang, S. Y. (2004). Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal

elements: novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced engineering materials*, 6(5), 299-303.

Zhang, Y., Zuo, T. T., Tang, Z., Gao, M. C., Dahmen, K. A., Liaw, P. K., & Lu, Z. P. (2014). Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in materials science*, 61, 1-93.

BÖLÜM 6

Refrakter Yüksek Entropi Alaşımları

**Nuri Ergin¹ & Necati Koçak² &
Kamile Kavuncioğlu³ & Feyza Yiğit⁴**

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya Türkiye, ORCID ID: 0000-0001-9025-9419

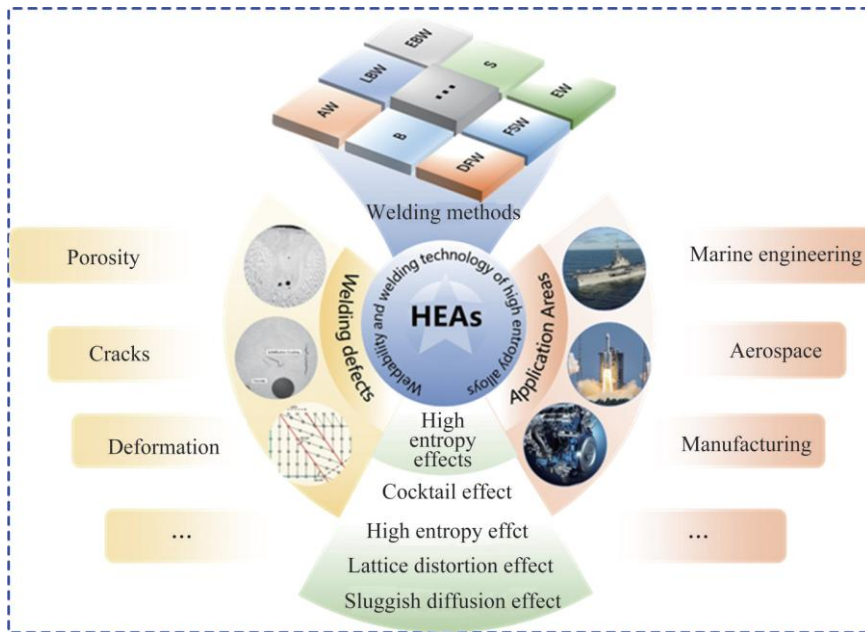
² Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya Türkiye, ORCID ID: 0009-0007-6389-2682

³ Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya Türkiye, ORCID ID: 0009-0001-2228-2024

⁴ Arş. Gör., Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya Türkiye, , ORCID ID: 0000-0002-0768-3479

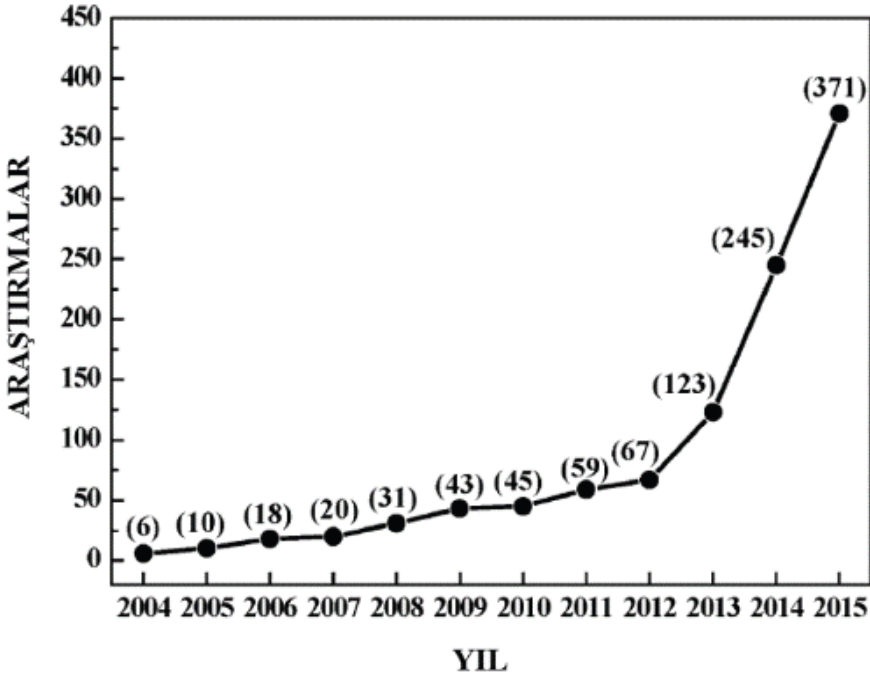
1. Giriş

İnsanlık tarihi boyunca, toplumsal ihtiyaçların karşılanmasına yönelik arayışlar, malzeme biliminin doğuşuna zemin hazırlamış; bu süreç, altın ve bakır gibi saf metallerin keşfiyle başlamış, Bronz Çağı'nda bakır ve arsenik elementlerinin bir arada kullanılmasıyla ilk alaşımlama uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Zamanla, bu gelişmeler ikili (ör. Fe-C), üçlü (ör. Ni-Co-Al), dörtlü (ör. Ni-Co-Al-Cr) ve beşli (ör. Ni-Fe-Cr-Ti-Al) sistemlerin yanı sıra daha kompleks alaşımların geliştirilmesiyle devam etmiştir. Şekil 1'de yüksek entropili alaşımların kaynak teknolojisine ilişkin yöntemler, kusurlar, temel yüksek entropi etkileri ve uygulama alanları şematik olarak sunulmaktadır.



Şekil 1. Yea kaynak teknolojisine ilişkin özelliklerin görsel olarak özetlenmesi

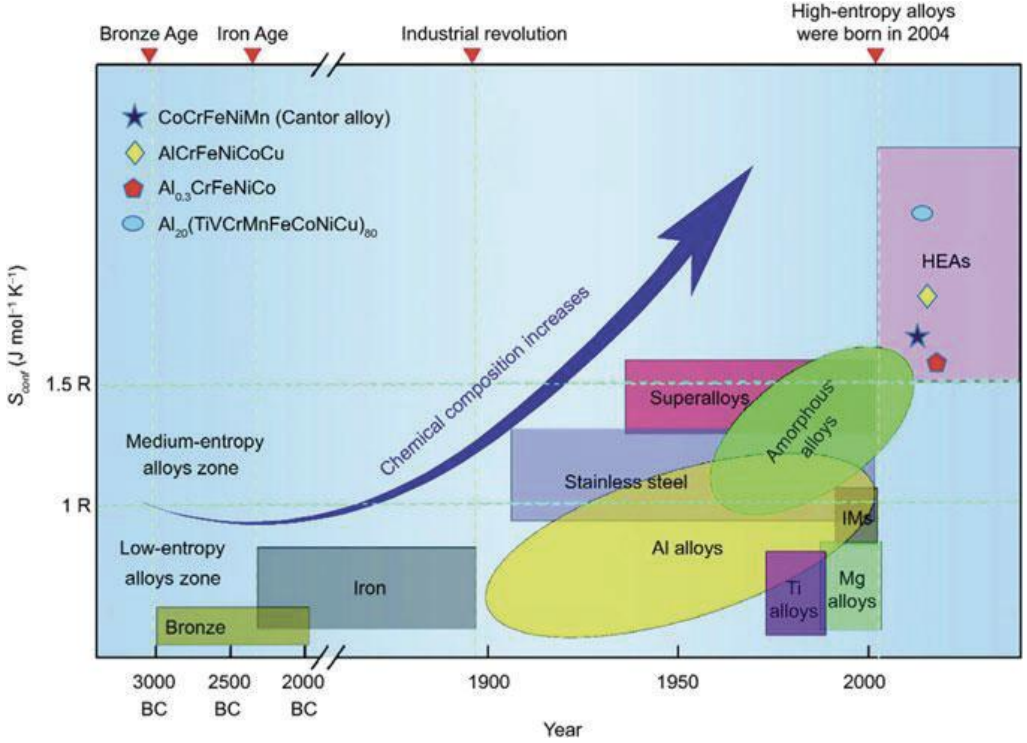
2004 yılında Profesör Yeh ve Cantor tarafından öncü çalışmaları yapılan, yüksek entropili alaşımlar (HEA) malzeme bilimi alanında çığır açan yeni bir konsept olarak ortaya çıkmıştır. YEA'lar çoğunlukla eşit veya daha yüksek oranlarda karıştırılmış beş veya daha fazla alaşım elementinden oluşmakta ve alaşım elementi konsantrasyonları %5 ile %35 arasında değişim göstermektedir.



Şekil 3. 2015 yılı sonuna kadar yüksek entropili alaşımların gelişim süreci ve bu alanda gerçekleştirilen araştırma çalışmaları özetlenmektedir

YEA'larının üstün özelliklere sahip olmasını sağlayan oluşum mekanizması yüksek entropi etkisi, şiddetli kafes bozulması etkisi, yavaş yayılma etkisi ve kokteyl etkisi ile açıklanmaktadır. Bu çok bileşenli sistemlerin yüksek karıştırma entropisi, konseptin anahtarı olarak tanımlanmaktadır. Bu katı çözelti fazlarının oluşumunu tahmin etmek için bazı ampirik kriterler ortaya çıkarmıştır. Bunlar arasında, elementler arasındaki kimyasal afiniteye bağlı karıştırma entalpisi ΔH_{mix} , atom yarıçapı farklarına bağlı boyut parametresi δ ve karıştırma entalpisinin ve karıştırma entropisinin Gibbs serbest enerjisindeki göreceli katkılarını tanımlayan parametre Ω en güvenilir kriterler olarak görünmektedir. Yüksek Entropili Alaşımlar (YEA), günümüzde hem yapısal (örneğin refrakter, biyomedikal, inşaat sektörleri) hem de fonksiyonel (elektronik, manyetik, termoelektrik ve süperiletken) uygulamalarda kullanılmak üzere yeni nesil malzemelerin geliştirilmesinde dikkat çeken alaşım gruplarından. Bu alaşımlar, oda sıcaklığından yüksek sıcaklıklara kadar geniş bir aralıkta mekanik açıdan kararlı yapı sergilemeleriyle ön plana çıkmaktadır. Yüksek sertlik ve dayanım, yüksek sıcaklık stabilitesi, üstün çekme dayanımı ve süneklik gibi mekanik özelliklerinin yanı sıra; zorlu çevre koşullarına karşı aşınma ve korozyon direnci gibi ileri düzey refrakter özellikleriyle de dikkat çekmektedirler. Bugüne kadar yaklaşık 37 farklı elementin çeşitli kombinasyonlarıyla dünya genelinde 600'den fazla farklı YEA sistemi laboratuvar ortamında sentezlenmiş

ve karakterize edilmiştir. Şekil 2’de, insanlığın yaklaşık son 10.000 yıl boyunca kullandığı malzemelere ilişkin geniş bir panorama sunulmakta olup, yüksek entropili alaşımların geliştirilmesine kadar geçen süreçte seramiklerden metallere, polimerlerden kompozitlere uzanan çeşitli malzeme türlerinin tarihsel gelişimi gösterilmektedir. [1-12].

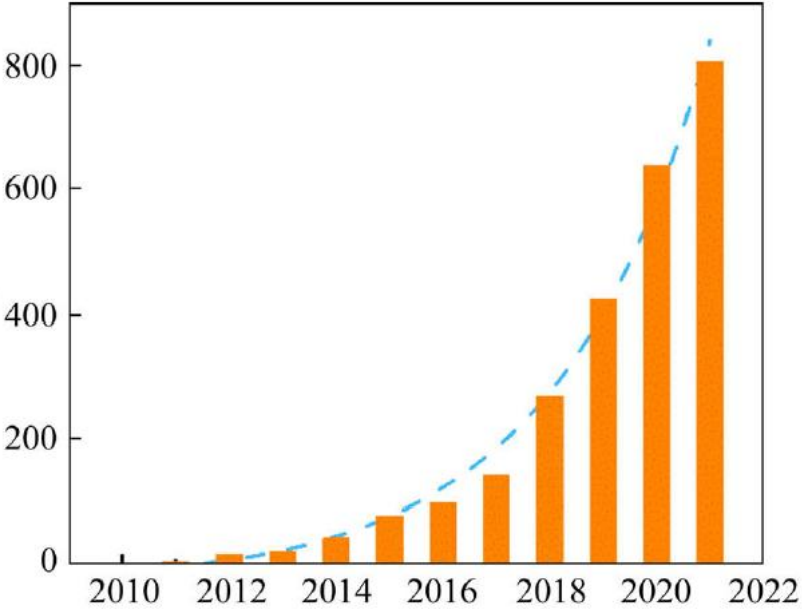


Şekil 1. Zaman içerisinde entropi temelli malzeme kullanımındaki değişimin gösterimi

2. REFRAKTER YÜKSEK ENTROPİ ALAŞIMLARININ ÖNEMİ VE ORTAYA ÇIKIŞI

Refrakter metaller ve alaşımlar çok yüksek erime noktalarına ve üstün yüksek sıcaklık mekanik özelliklerine sahiptir ve bu da onları ultra yüksek sıcaklık uygulamaları için çok umut verici hale getirmiştir. HEA fikrinden ilham alan araştırmacılar, HEA'lara refrakter elementler, yani refrakter yüksek entropili alaşımlar (RHEA'lar) eklemişlerdir. SENKOV ve arkadaşları, 2010 yılında MoNbTaW ve MoNbTaVW RHEA'larını geliştirdiklerini bildirmişlerdir. Bu iki RHEA ile, yüksek sıcaklıklarda mükemmel yüksek sıcaklık özellikleri yakalamışlar ve yüksek sıcaklık mekanik özellikleri açısından süper alaşımların özelliklerine büyük ölçüde ulaşmışlardır. Daha sonra oldukça fazla RHEA geliştirilmesine rağmen, oda sıcaklığında çekme sünekliği gösteren TiZrHfNbTa alaşımı dışında çoğu RHEA sınırlı oda sıcaklığı sünekliği sergilemektedir.

Refrakter malzemeler, aşınma direnci, yüksek sertlik, yüksek sıcaklık direnci, korozyon direnci, yüksek mekanik mukavemet ve yorulma direncine sahip olan malzemeler arasındadır. Bu özellikler, refrakter malzemelerin metalurji, seramik üretimi, cam endüstrisi, metal işleme ve enerji üretimi gibi çeşitli endüstrilerde kullanılmasını sağlamaktadır. Refrakter malzemeler arasında, Refrakter Yüksek Entropili Alaşımlar (RHEA'lar), Refrakter Yüksek Entropili Kompozitler (RHE-C'ler) ve Refrakter Yüksek Entropili Seramikler (RHE-Ce) gibi özel malzemeler, geleneksel alaşımlara kıyasla üstün özellikleriyle öne çıkmaktadır. RHEA'lar, yüksek erime sıcaklıkları, yüksek sıcaklık direnci, yüksek korozyon ve aşınma direnci ve yüksek mekanik ve yorulma mukavemetleri nedeniyle şu anda en çok araştırılan malzemeler arasındadır. Bu üstün özelliklerinden dolayı RHEA'lar, özellikle nükleer reaktörler, gaz türbinleri, havacılık ve uzay uygulamaları ile enerji üretim tesisleri gibi zorlu çalışma koşullarında kullanım potansiyeli yüksek, ileri düzey malzemeler olarak kabul edilmektedir. Çoğu RHEA, nispeten düşük sıcaklıklarda yüksek mukavemet ve sertliğe hakim olan katı çözelti güçlendirme mekanizması olan tek bir katı çözelti fazı oluşturmaktadır. RHEA'ları güçlendirmek için ayrıca çökeltme, tane sınırı ve ikinci faz güçlendirme gibi diğer yöntemler de kullanılmıştır ve bu, RHEA'ların geleneksel alaşımlara kıyasla daha iyi mekanik performans elde etmesini kolaylaştırmıştır. Sonuç olarak, RHEA'ların yeni nesil yüksek sıcaklık yapısal malzemeleri olma potansiyeli büyüktür ve konu hakkındaki yayınlar, Şekil 1'de gösterildiği gibi istikrarlı bir şekilde artmaktadır. [12,13].



Şekil 1. Ağustos 2021 sonu itibarıyla açık literatürde bildirilen RHEA'lar hakkındaki yayınların kümülatif sayısı, yıla bağlı olarak

Yüksek entropi alaşımları (HEA'lar), nispeten yeni bir araştırma alanı olarak yalnızca son yirmi yıl içerisinde bilimsel ilgi odağı haline gelmiştir. Mevcut literatürde yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu, esas olarak geçiş metallerinin yüksek entropi alaşımlarının mikro yapısal özellikleri ve mekanik performansları üzerindeki etkilerine odaklanmıştır. Buna karşılık, nadir toprak elementlerinin dahil edildiği yüksek entropi alaşımları araştırma bağlamında oldukça sınırlı bir şekilde ele alınmış ve bu özgün malzeme grubunun davranışları, özellikleri ve potansiyel uygulama alanları hakkında kapsamlı bilgi eksikliği devam etmektedir. Dolayısıyla, nadir toprak elementleri katkılı yüksek entropili alaşımların daha derinlemesine incelenmesi, malzeme bilimi disipliniinde hâlen önemli ve öncelikli bir araştırma ihtiyacı olarak varlığını sürdürmektedir [14].

3. RHEALARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Son yıllarda, özellikle refrakter yüksek entropili alaşımların (RHEA'lar) hızla geliştirilmesi, tek bir katı çözelti yapısı oluşturabilen ve mükemmel aşınma ve korozyon direnci, yüksek sıcaklık oksidasyon direnci, mekanik ve diğer özelliklere sahip olan yüksek entropili alaşımların hızla geliştirilmesiyle araştırmacılar için önemli bir konu haline gelmiştir. Ancak, refrakter yüksek entropili alaşımlar genellikle yüksek yoğunluklara ($>10 \text{ g/cm}^3$) ve düşük oda sıcaklığında süneklığe sahiptir; bu da havacılık ve uzay uygulamalarında kullanımlarını sınırlamaktadır. Hacim merkezli kübik (BCC) refrakter yüksek entropili alaşımlar (RHEA'lar), özel dislokasyon aktiviteleri sayesinde yüksek sıcaklıklarda uzun süre dayanım mukavemetleri veya daha az yumuşama gibi çok iyi mekanik performans gösterdikleri için büyük ilgi görmektedir. İlk geliştirilen tek fazlı WTaMoNbV RHEA, 1600°C gibi yüksek bir sıcaklıkta yaklaşık 400 MPa'lık bir akma dayanımına sahipti, ancak yüksek yoğunluğu ve düşük oda sıcaklığı sünekliliği, endüstriyel uygulamasını sınırlı kılmaktadır. Daha sonra, daha düşük yoğunluklu ve daha yüksek sünekliliğe sahip HfNbTaTiZr katı çözelti RHEA'sı geliştirildi, ancak nispeten düşük mukavemeti ve özellikle de ciddi yüksek sıcaklık yumuşaması, tipik RHEA'ların yüksek sıcaklık mukavemetinin avantajını dengelemektedir. [15,16].

3.1 Sürünme Özellikleri

Yüksek sıcaklık uygulamalarında sürekli yüklerin varlığı, malzemelerde sürünme hasarına yol açabilmektedir. Hem yüksek sıcaklıklara hem de sabit yüklere maruz kalan malzemelerin yüksek sürünme mukavemetine sahip olması arzu edilmektedir. RHEA'nın sürünme performansı üzerine yapılan mevcut çalışmalar, sürünme davranışlarını net bir şekilde açıklamakta yetersiz kalmıştır. Bu nedenle, RHEA'nın sürünme davranışını ortaya çıkarmak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. RHEA'nın yüksek sıcaklıklardaki mukavemeti, oksidasyon direnci ve korozyon direnci, onları yüksek sıcaklık uygulamaları için önemli kılarken, sürünme mukavemetleri üzerine yapılan yetersiz araştırmalar, yüksek sıcaklık uygulamalarının her alanında kullanımları hakkında soru

işaretleri yaratmaktadır. Bu nedenle, RHEA'nın sürünme davranışı ve mekanizmalarının daha fazla araştırılması ve anlaşılması ve sürünme özelliklerini keşfetmek için daha fazla çalışmalara ihtiyaç vardır. Gadelmeier ve arkadaşları, TiZrHfNbTa RHEA'nı çökeltme sertleştirilmesiyle güçlendirilmiş tek kristalli nikel bazlı süperalaşımı ile kıyaslamışlardır. Bu süperalaşımın, 980 °C'de RHEA'ya göre sürünme açısından 25 kat, 1.100 °C'de ise 70 kat daha güçlü olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, RHEA'nın mikro yapısının kararsız olduğu ve sürünme sırasında faz ayrışmasına uğradığı da gözlemlenmiştir [16-23].

3.2 Yüksek Sıcaklık Dayanımı ve Termal Kararlılık

Refrakter YEA'lar (RHEA'lar), 800°C'yi aşan ve hatta bazı durumlarda 1500°C'ye kadar ulaşan yüksek sıcaklıklardaki benzersiz mekanik özellikleri sayesinde çeşitli YEA türleri arasında öne çıkar ve bu da onları yüksek sıcaklık yapısal uygulamaları için uygun seçenekler haline getirir ve tipik Ni bazlı süper alaşımlardan daha iyi performans gösterir. Yüksek sıcaklıklardaki yüksek mukavemetleri, yüksek erime noktaları ve sürtünme ve aşınmaya karşı direnç özelliklerinin getirdiği yüksek sertlikleri sayesinde refrakter yüksek entropili alaşımlar, havacılık motorlarında, gaz türbinlerinde ve nükleer ısınlama alanında kullanılabilir. W, Ta, Nb, Mo, Hf, Zr, Ti, V ve Cr refrakter elementleri içeren HMK yapılı refrakter yüksek entropili alaşımlar (RHEA'lar) için on yılı aşkın bir süredir devam eden geliştirme çalışmalarının ardından daha fazla çalışma potansiyeli oluşmuştur. Yüksek ergime noktaları, yüksek mukavemet, düşük yoğunluk ve yüksek sıcaklıklarda mükemmel yüksek sıcaklık yumuşama direnci sayesinde yüksek sıcaklık uygulamaları için umut vadeden adaylardır. Senkov ve arkadaşları, geleneksel süper alaşımlara kıyasla 1600°C'de 405 ve 477 MPa'lık yüksek akma dayanımı gibi açıkça üstün mekanik özellikler sergileyen tek düzensiz HMK katı çözelti fazlı RHEA'lar NbMoTaW ve VNbMoTaW'ı kamuoyuna açıklamıştır. Liu ve arkadaşları NbTaHfTiZrV_{0.5} RHEA'nın yüksek sıcaklıklarda dayanımının iyi olduğunu ve havacılık ve uzay endüstrisinde yüksek sıcaklığa dayanıklı parçaların hazırlanması için yeni nesil yüksek sıcaklık malzemeleri olarak kullanılma potansiyeline sahip olduğunu bildirmişlerdir [24, 25].

3.3 Oksidasyon davranışı

Refrakter yüksek entropili alaşımlar, yüksek sıcaklık uygulamaları için aday olarak kabul edilmektedir. Bazıları T 1000 °C'de yüksek mukavemete sahiptir ve bu nedenle ticari nikel bazlı süper alaşımlardan daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilmektedir. Bazı RHEA'lar, çekme koşullarında bile oda sıcaklığında yeterince sünektir ve soğuk haddelenebilir. Ancak, refrakter elementler ve alaşımları genellikle oksidasyona karşı hassastır. Farklı RHEA'ların oksidasyon davranışlarına odaklanan bir dizi çalışma, bazılarının geleneksel refrakter alaşımlarından çok daha iyi oksidasyon direncine sahip olduğunu göstermiştir; ancak oksidasyon davranışı büyük ölçüde alaşım bileşimine ve test koşullarına

bağlıdır. Oksidasyon direncini artırmak için Al, Cr ve Si, Al_2O_3 , Cr_2O_3 ve SiO_2 gibi koruyucu tabakalar oluşturmak üzere eklenmiştir. Bu refrakter olmayan metallerin eklenmesi, yüksek sıcaklık oksidasyon direncini artırmak için umut verici bir yöntem gibi görünmektedir. Ancak, RHEA'ya Al, Cr ve Si eklenmesi, istenmeyen intermetaliklerin (örneğin, Nb_5Si_3 , NbCr_2 , MoSi_2 ve Nb_3Al) oluşma olasılığını artırır ve kırılganlığa neden olur. Ayrıca, Zr veya Hf içeren alaşımlara Al, Cr ve Si gibi alaşım elementlerinin eklenmesi, termodinamik olarak Al_2O_3 , Cr_2O_3 ve SiO_2 'ye kıyasla daha elverişli olan ZrO_2 ve HfO_2 oluşumu nedeniyle sınırlı bir etkiye sahiptir. V, Mo ve W oksitleri (özellikle V_2O_5 , MoO_3 ve WO_3) yüksek sıcaklıklarda uçucu özelliktedir. V ve Mo elementlerinin oluşturduğu V_2O_5 ve MoO_3 oksitleri sırasıyla 690 °C'de sıvılaştırılır ve 600 °C'nin üzerinde önemli ölçüde süblimleşir. Bu uçucu özellik, oksit filminin bütünlüğünü tehlikeye atar ve oksidasyon reaksiyonlarını hızlandırır. Nb ve Ta oksitleri (yani Nb_2O_5 ve Ta_2O_5) gözenekli ve kırılgandır, bu da onları yüzeylerinden tabaka halinde dökülmeye eğilimli hale getirir. RHEA'lara Cr eklenmesi, Cr_2O_3 gibi koruyucu oksitlerin yanı sıra CrNbO_4 ve CrTaO_4 dahil olmak üzere Ta ve Nb içeren kompozit oksitlerin oluşumunu destekler. Bu kompozit oksitler, oksijen difüzyonunu engelleyen yoğun bir oksit tabakasının oluşmasına yardımcı olarak oksidasyon direncini artırır. Ayrıca, Ti eklenmesi, kompakt bir oksit pasivasyon tabakasının oluşumunu teşvik ederek malzemenin oksidasyona karşı direncini güçlendirir. Yapılan araştırmaların büyük çoğunluğunun T 1000 °C sıcaklıklarında gerçekleştirildiğini göz önünde bulundurmak gerekmektedir. Pesting, tane sınırı oksidasyonu nedeniyle metalik alt tabakanın hızlı bir şekilde dağılması anlamına gelen, 600–800 °C gibi orta sıcaklıklarda meydana gelebilen alışılmadık bir süreçtir. Sheikh ve arkadaşlarına göre, koruyucu oksit tabakalarının oluşmaması ve hızlandırılmış iç oksidasyon, $\text{Hf}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{Ta}_{0.5}\text{Ti}_{1.5}\text{Zr}$ RHEA'daki pesting mekanizmalarıdır. Bu alaşımdaki pesting olayı, Zr ve Hf'nin aynı anda uzaklaştırılmasıyla ortadan kaldırılabilir. Müller ve arkadaşları [29], yaptıkları çalışmada bir dizi refrakter yüksek entropili alaşımın (TaMoCrTiAl , NbMoCrTiAl , NbMoCrAl ve TaMoCrAl) 1000 °C'de havada yüksek sıcaklıkta oksidasyon mekanizması incelenmiş ve Ti'nin CrTaO_4 oluşumunu desteklediğini bulmuşlardır. Ayrıca TaMoCrTiAl 'in 1000 °C'de havadaki üstün oksidasyon direnci, koruyucu Al_2O_3 , Cr_2O_3 ve CrTaO_4 oksit tabakalarının oluşumunun bir sonucu olduğunu tespit etmişlerdir [26-30].

4. Üretim Yöntemleri

Geniş uygulama alanlarına sahip refrakter malzemeler için üretim yöntemleri, yüksek erime noktaları ve yüksek sıcaklıklarda oksidasyon potansiyelleri nedeniyle sınırlıdır. Bu malzemeler genellikle toz metalurjisi ve magnetron püskürtme gibi yöntemler kullanılarak üretilmektedir. En yaygın kullanılan hazırlama yöntemi, esas olarak vakum ark eritme, indüksiyon eritme ve elektron ışınlı eritme yöntemlerini içeren eritme döküm yöntemidir. Ergitme yöntemi, çubuk, şerit ve mikrotel şeklinde HEA'lar üretmek için halihazırda kullanılmaktadır. Bu geleneksel üretim yöntemlerine ek olarak, benzersiz yenilikler ve avantajlar sunan eklemeli üretim teknikleri, refrakter malzeme üretiminde giderek daha popüler hale gelmiştir. Bu yöntemler arasında Toz Yatak Füzyon (PBF) ve Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme (DED) en çok tercih edilenlerdir. Bu yöntemlerin kullanılmasının temel nedenleri arasında yüksek sıcaklıklara ulaşabilmeleri, neredeyse her karmaşıklık seviyesinde geometri üretebilmeleri, hızlı prototipleme sayesinde hızlı ürün geliştirme ve tüm montajların tek adımda üretilmesiyle parça sayısının azaltılması yer alır. Eklemeli üretim yöntemleri, geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla önemli ölçüde üstün özellikler sunarak karmaşık ve daha hafif parçaların üretimine ve hızlı prototiplemeye olanak tanır. Bu durum havacılık, dış hekimliği, otomotiv, tıp, elektronik gibi çeşitli alanlarda bu yöntemlerin tercih edilmesine yol açmıştır [13,17].

4.1 Vakum İndüksiyon Ergitme

Vakum İndüksiyonla Ergitme (VIM), bir alaşımın vakumda ya da inert gaz atmosferinde, bobinler aracılığıyla elektromanyetik indüksiyon kullanılarak eritildiği yaygın bir *ergitme-döküm* yöntemidir. Bu süreçte ana enerji kaynağı, indüksiyon bobininden geçirilen alternatif akımın oluşturduğu alternatif manyetik alandır.

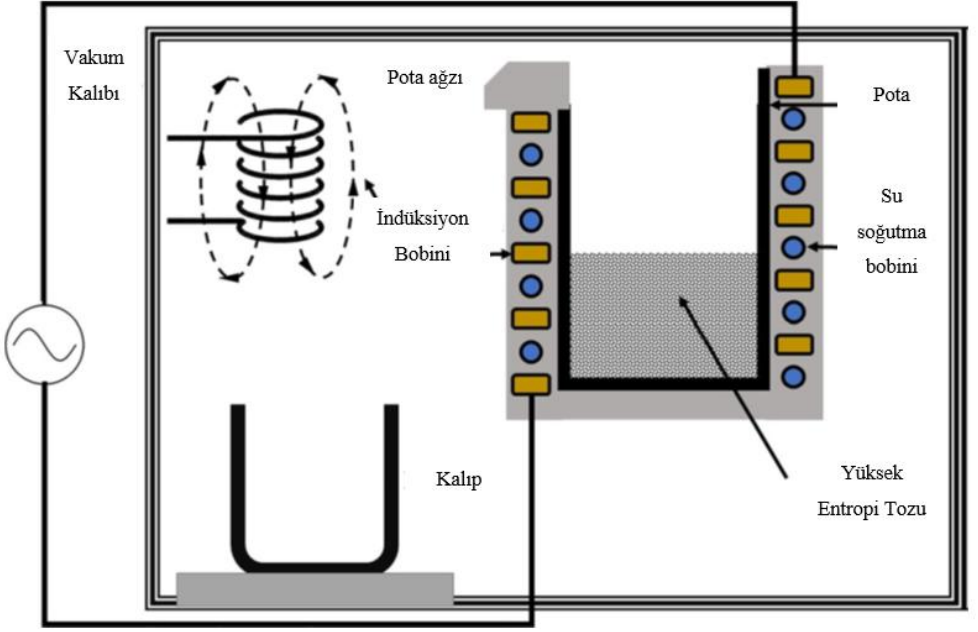
Refrakter potalarda uygulanan diğer eritme tekniklerine kıyasla, titanyum alaşımlarının VIM ile işlenmesi daha düşük enerji gerektirir; ayrıca yüksek aşırı ısınma sıcaklıklarına ulaşılabilirdiği için döküm parçalarının kalitesi artar. Elektromanyetik karıştırma, eriyiğin hızlı biçimde homojenleşmesini sağlar ve yöntem çoğu alternatife göre daha ekonomiktir. Uygulamada çoğunlukla grafit potalar tercih edilir; çünkü kullanım kolaylığı, maliyet avantajı ve eriyik ürünün kimyasal homojenliğine katkılarıyla öne çıkarlar. İndüksiyonla ergitmenin bir diğer önemli üstünlüğü, alaşım bileşiminin hassas biçimde yönetilebilmesidir. İşlem dikkatli yürütüldüğünde, külçenin martenzit başlangıç (Ms) sıcaklığı $\pm 5^\circ\text{C}$ doğrulukla kontrol edilebilir. Grafit dışındaki pota malzemeleri ise oksijen oluşumuna bağlı sorunlar, termal çatlamaya yatkınlık, daha yüksek maliyetler ve termodinamik kararsızlık gibi dezavantajlar gösterebilir [18,19].

Vakum indüksiyon ergitme özellikle O_2 ve N_2 den arındırılmış bir atmosferde ergitilmesi gereken malzemeler için tasarlanmıştır. Bu proses yüksek alaşımlı çeliklerin ve süper alaşımların ergitilmesinde oldukça başarılı olmuştur.

Grafit potalarla birlikte uygulanan Vakum İndüksiyonla Ergitme (VIM) oldukça dikkat çekicidir. Bunun temel nedenleri şunlardır:

- Kullanım kolaylığı: Grafit potalar işlemlerde pratik ve sorunsuz bir kullanım sunar.
- Ekonomiklik: Bu yöntem, alternatiflerine göre en düşük maliyetli seçenektir.
- Kimyasal homojenlik: Grafit potalar, elde edilen alaşımların üstün kimyasal homojenlik göstermesine olanak tanır.

Genel olarak Vakum İndüksiyon Fırınları (VIM), oksijen ve azotla yüksek etkileşimleri sebebiyle atmosferik koşullarda işlenemeyen saf metallerin ve alaşımların ergitilmesinde tercih edilmektedir. İsminden de anlaşılacağı üzere yöntem, metallerin vakum ortamında ya da inert gaz atmosferinde eritilmesine dayanır. Süreç özetle şöyle işler: Elektriksel iletken malzemeler, elektromanyetik indüksiyon ile oluşturulan manyetik alan sayesinde ısıtılır. Bu manyetik alan, iletkenler üzerinden akım geçmesine yol açar ve Eddy akımları adı verilen girdap akımlarını oluşturur. Ortaya çıkan bu akımlar, malzemenin ısınmasını ve pota içerisindeki külçenin erimesini sağlar. Pota, giriş akımını engellediği için manyetik alan iletken malzemeler üzerinden üretilir ve böylece iç kısım hızla ergir (Şekil 2’de gösterildiği gibi). Ergitme tamamlandığında külçe soğutulur ve yüksek entropili alaşımın homojenliğini artırmak amacıyla birkaç kez yeniden ergitme işlemi uygulanır. Son aşamada ise eriyik alaşım, istenilen kalıba dökülerek katılaşmaya bırakılır ve böylece yüksek entropili alaşım elde edilmiş olur. [20-22].

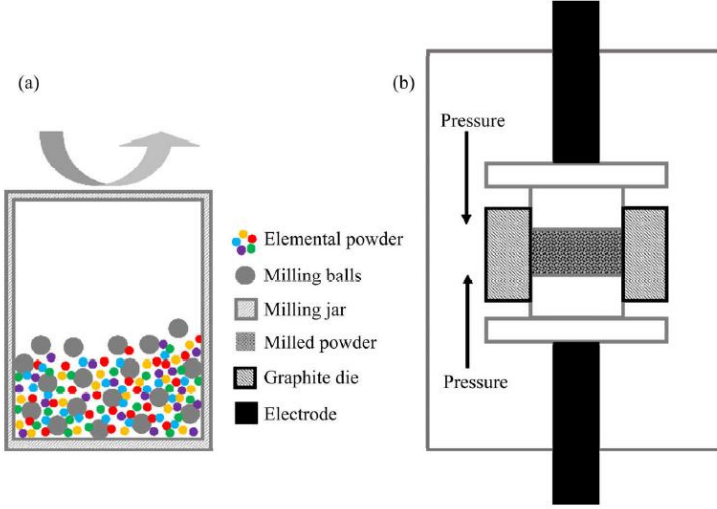


Şekil 2 Vakum indüksiyonlu eritme işleminin şematik diyagramı [22]

4.2 Toz metalurjisi ve SPS (Spark Plasma Sintering)

Toz metalurjisi, RHEA'ların hazırlanmasında kullanılan yaygın bir yöntemdir. Alaşım tozları, bu şekilde element karışımlarının mekanik olarak alaşımlanması veya ön alaşım külçelerinin doğrudan gaz atomizasyonu ile alaşımlanması yoluyla kullanılır. RHEA hazırlama yönteminin temel noktası, alaşımlı tozlar elde etmektir. Gaz atomizasyonu ile ön alaşımlama tozları, yalnızca kimyasal olarak homojen değil, aynı zamanda tek tip boyutta oldukları için en iyi sonucu verir. Ancak, ön alaşımlama tozları genellikle yüksek maliyetlidir ve daha fazla hazırlık süresi gerektirir, bu da onları mekanik alaşımlama tozlarına göre daha az kullanışlı hale getirmektedir. Tozları birleştirmek için kıvılcım plazma sinterleme (SPS) ve sıcak izostatik presleme (HIP) kullanılır. Toz metalurjisi, metal tozlarını hammadde olarak kullanan, öğütme ve soğuk alaşımlama işlemlerini içeren bir yöntemdir. Bu yöntemde, metal tozları bir öğütücü içinde mekanik olarak kırılır ve soğuk kaynak yapılır. Bu yöntemde, bir kap belirli bir oranda bilye/tozla doldurulur ve alaşımlama işlemi, yaklaşık 400 rpm dönüş hızında belirli bir süre öğütülerek gerçekleştirilir. Bu yöntemdeki alaşımlama mekanizması, tozların bilyeler arasında ve bilyeler ile kap duvarı arasında mekanik olarak çarpmasıyla oluşur ve bu da kırılabilir tozların kırılmasına, sünek tozların ise düzleşmesine neden olur. Kırılan tozlar, düzleştirilmiş sünek tozlar tarafından yakalanır ve devam eden öğütme işlemi, kırma ve soğuk kaynaklama işlemlerini sürdürerek alaşımlamayı tamamlar. Bu yöntemle sentezlenen RHEA'lar daha sonra kıvılcım plazma sinterleme işlemine tabi tutularak yaklaşık %100 yoğunluğa sahip

numuneler elde edilir. Bu numuneler üzerinde mekanik ve mikroyapısal özelliklerin incelenmesi amacıyla çeşitli analizler yapılmaktadır. Mekanik alaşımlamanın (yüksek enerjili bilyeleme) ve SPS'nin şematik diyagramı Şekil 3'te gösterilmiştir [11,13].



Şekil 3 Mekanik alaşımlamanın (yüksek enerjili bilyeleme) (a) ve SPS'nin (b) şematik diyagramı[11]

5. ENDÜSTRİYEL UYGULAMALAR VE GELECEĞE YÖNELİK PERSPEKTİFLER

Basit faz bileşimi ve mükemmel kapsamlı performansı, HEA'ları iyi bir geliştirme potansiyeline sahip kılmaktadır. Ana bileşen olarak refrakter metaller içeren RHEA'lar, özellik olarak geleneksel refrakter metal ve alaşımlardan üstün niteliktedir ve nikel bazlı süperalaşımlara alternatif olarak değerlendirilmektedir. RHEA'lar, oda ve yüksek sıcaklık mekanik özellikleri, yüksek sıcaklık oksidasyon direnci, korozyon direnci vb. gibi mükemmel mekanik özelliklere, geniş uygulama olanaklarına ve araştırma değerlerine sahiptir. Son yıllarda, RHEA'lar üzerine yapılan araştırmalar giderek daha kapsamlı ve derinlemesine çalışmalar haline gelmektedir. Bu nedenle, yeni yüksek sıcaklık ve yüksek mukavemetli alaşımların geliştirilmesi için geniş bir alaşım geliştirme fikri sunmaktadırlar. RHEA'lar, dikkat çekici kapsamlı özelliklere sahiptir ve havacılık, ulusal savunma, nükleer endüstri, tıbbi cihazlar ve diğer alanlarda önemli uygulama olanakları bulunmaktadır. Nikel bazlı süperalaşım kullanan tüm bileşenler, RHEA'ların potansiyel uygulama alanlarıdır; örneğin uçak motorlarının yüksek sıcaklık bileşenleri, ısı eşanjörü boruları, kimyasal işleme endüstrisi ve askeri endüstrideki süperalaşım bileşenleridir. Bunlar ayrıca geleneksel refrakter metal ve alaşımların yerini alabilir. Ve bunlar, sıvı roket

motoru nozulları, nükleer reaktörler ve yüksek sıcaklık fırınlarının ısıya dayanıklı malzemelerine uygulanır. Ayrıca, daha fazla element içeren RHEA'lar mükemmel oda sıcaklığı mukavemeti ve sertliğine sahiptir ve daha geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Oda sıcaklığında mükemmel bir yapısal malzeme ve aşınmaya dayanıklı malzeme olarak kullanılabilir ve kesici takımlar, aşındırıcı aletler vb. yapımında kullanılabilir. Son 12 yıldır bilim insanları yeni RHEA'lar tasarlamakta ve üretim süreçlerini yenilemektedir. Ayrıca, araştırmacılar RHEA'ların mekanik, oksidasyon, korozyon ve aşınma davranışları üzerine birçok çalışma yürütmüş ve büyük ilerleme kaydetmiştir. Farklı zorlu ortamlar için mükemmel performansa sahip birçok özel RHEA geliştirilmiştir. Birçok çalışma, farklı içeriklere sahip çeşitli elementler içerdikleri ve geniş bir bileşim alanına sahip oldukları için RHEA'lara odaklanmış olsa da, RHEA'ların temelleri hakkında çok az bilgiye sahibiz ve bu da yeni alaşımların keşfi ve geliştirilmesi için sınırsız olanaklar sunmaktadır. Mevcut RHEA malzemelerine ve bildirilen literatüre dayanarak, gelecekte çeşitli evrim beklentileri ve fırsatları önerilmektedir. En iyi RHEA yapısının henüz bulunmadığı görülmektedir. HEA'lar çok çeşitli bileşenlere sahiptir ve RHEA'lar binlerce geliştirilmemiş bileşene sahiptir ve bu da bize birçok tasarım fırsatı sunar. Araştırmacıların, deneyler, hesaplamalar ve gelişmiş malzeme geliştirme araçlarının bir kombinasyonunu kullanarak bu ilgi çekici ve geniş yeni malzeme alanı hakkında daha fazla araştırma yaparak gelişime katkıda bulunmaları beklenmektedir [30,31].

Kaynaklar

- [1] Kağan Şarlar, Nadir Toprak Elementi İçermeyen Yüksek Entropili Alaşımın Manyetik Ve Manyetokalorik Özelliklerinin İncelenmesi, 2019
- [2] B.S. Murty, J.W. Yeh, S. Ranganathan, High-Entropy Alloys, 2014 [3] Ayberk Ayrenk, Synthesis And Development Of Refractory High Entropy Alloys, 2020
- [4] Weidong Li, Di Xie, Dongyue Li, Yong Zhang, Yanfei Gao, Peter K. Liaw, Mechanical behavior of high-entropy alloys, 2021
- [5] Wang, G. Y., Hsu, W. C., Huang, Z. W., Yeh, J. W., & Tsai, C. W. (2025). The Growth Activation Energy of Sigma Phase in Nonequal Molar CoCrFeNiV Low Entropy and High Entropy Alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 178863.
- [6] Kucza, W. (2025). Do “high-entropy alloys” have high entropy? *Journal of Materials Research*, 40(7), 1046-1055.
- [7] Tang, J. Q., Li, J., Liu, K., Xu, C., & Sonar, T. (2025). Weldability and welding technology of high-entropy alloys: A review. *Journal of Central South University*, 32(4), 1141-1166.
- [8] Liliensten, L., Couzinié, J. P., Perrière, L., Bourgon, J., Emery, N., & Guillot, I. J. M. L. (2014). New structure in refractory high-entropy alloys. *Materials Letters*, 132, 123-125.
- [9] ERGİN, N., KOÇAK, N., ÖZDEMİR, Ö., & UYSAL, M. (2022). Yüksek Entropi Alaşımlarına Genel Bakış. *Fen Bilimleri ve Matematikte Güncel Araştırmalar*.
- [10] Koppoju, S., Konduri, S. P., Chalavadi, P., Bonta, S. R., & Mantripragada, R. (2020). Effect of Ni on microstructure and mechanical properties of CrMnFeCoNi high entropy alloy. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 73(4), 853-862.
- [11] Tian, Y. S., Zhou, W. Z., Tan, Q. B., Wu, M. X., Shen, Q. I. A. O., Zhu, G. L., ... & Sun, B. D. (2022). A review of refractory high-entropy alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 32(11), 3487-3515.
- [12] D.B. Miracle, O.N. Senkov, A critical review of high entropy alloys and related concepts, 2017.
- [13] Guler, S. H., YAKIN, A., Guler, O., Chattopadhyay, A. K., & SIMSEK, T. (2024). A critical review of the refractory high-entropy materials: RHEA Alloys, Composites, Ceramics, Additively Manufactured Alloys. *Current Applied Physics*.

- [14] Jiang, W., Wang, T., Wang, X., Jiang, B., Wang, Y., Wang, X., ... & Zhu, D. (2024). A novel lightweight refractory high-entropy alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 33, 9062-9066.
- [15] Ko, P. H., Lee, Y. J., & Chang, S. Y. (2022). Microstructure and Mechanical Properties of Intergranular Boride Precipitation-Toughened HfMoNbTaTiZr Refractory High-Entropy Alloy. *Materials*, 15(19), 6666.
- [16] Gadelmeier, C., Yang, Y., Glatzel, U., & George, E. P. (2022). Creep strength of refractory high-entropy alloy TiZrHfNbTa and comparison with Ni-base superalloy CMSX-4. *Cell Reports Physical Science*, 3(8).
- [17] Zhang, B., Huang, Y., Dou, Z., Wang, J., & Huang, Z. (2024). Refractory high-entropy alloys fabricated by powder metallurgy: Progress, challenges and opportunities. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 9(2), 100688.
- [18] Simbarashe Fashu, Mykhaylo Lototskyy, Moegamat Wafeeq David, Lydia Pickering, Vladimir Linkov, Sun Tai, Tang Renheng, Xiao Fangming, Pavel V. Fursikov, Boris P. Tarasov, A review on crucibles for induction melting of titanium alloys, 2020
- [19] Mohammad H. Elahinia, Mahdi Hashemi, Majid Tabesh, Sarit B. Bhaduri, Manufacturing and processing of NiTi implants: A review, 2012
- [20] Murat AYDIN, Takım Çelikleri Üretiminde Kullanılan Vakum Ergitme Proseslerinin Metalurjik Karakterizasyonu, Teknik Yazı, Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Metalurji Mühendisleri Odası, Metalurji Dergisi-163. Sayı, 2012
- [21] J. Frenzel, Z. Zhang, K. Neuking, G. Eggeler, High quality vacuum induction melting of small quantities of NiTi shape memory alloys in graphite crucibles, 2004
- [22] Yaser A. Alshataif, S. Sivasankaran, Fahad A. Al-Mufadi, Abdulaziz S. Alaboodi, Hany R. Ammar, Manufacturing Methods, Microstructural and Mechanical Properties Evolutions of High-Entropy Alloys: A Review, 2019
- [23] Chen, W., & Li, X. (2024). A lightweight NbMoZrTi refractory high entropy alloy with high specific strength. *Materials Letters*, 354, 135330.
- [24] Liu, Z., Shi, X., Zhang, M., & Qiao, J. (2023). High-temperature mechanical properties of NbTaHfTiZrV0. 5 refractory high-entropy alloys. *Entropy*, 25(8), 1124.
- [25] Zhang, W., Jiang, W., Wu, S., Tao, S., Zhu, B., & Guo, S. (2022). Microstructural and Mechanical Evaluation of NbMoTiVSix (x= 0, 0.25) Refractory High-Entropy Alloys at High Temperature. *Advanced Engineering Materials*, 24(6), 2101248.

- [26] Yurchenko, N., Panina, E., Zharebtsov, S., Salishchev, G., Stepanov, N., Yurchenko, N., ... & Stepanov, N. Oxidation behavior of refractory AlNbTiVZr_{0.25} high-entropy alloy, *Materials* 11 (2018) 2526.
- [27] Muhammad, F., Sukhomlinov, D., Klemettinen, L., Sibarani, D., Basuki, E. A., Lindberg, D., ... & Prajitno, D. H. (2024). Oxidation Behavior of Al x HfNbTiVY_{0.05} Refractory High-Entropy Alloys at 700–900° C. *High Temperature Corrosion of Materials*, 101(4), 755-778.
- [28] Shi, M., Guan, Z., Qin, L., Yue, T., Yang, Z., & Zhao, J. (2025). High temperature oxidation behavior of Ta-Nb-Cr-Ti refractory high-entropy alloy coating. *Materials Letters*, 138660.
- [29] Müller, F., Gorr, B., Christ, H. J., Müller, J., Butz, B., Chen, H., ... & Heilmaier, M. (2019). On the oxidation mechanism of refractory high entropy alloys. *Corrosion Science*, 159, 108161.
- [30] Hua, X. J., Hu, P., Xing, H. R., Han, J. Y., Ge, S. W., Li, S. L., ... & Cui, C. J. (2022). Development and property tuning of refractory high-entropy alloys: a review. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 35(8), 1231-1265.
- [31] Xiong, W., Guo, A. X., Zhan, S., Liu, C. T., & Cao, S. C. (2023). Refractory high-entropy alloys: A focused review of preparation methods and properties. *Journal of Materials Science & Technology*, 142, 196-215.

BÖLÜM 7

Li-iyon Piller İçin Kalay Esaslı Anot Malzemeleri

Miraç Alaf¹

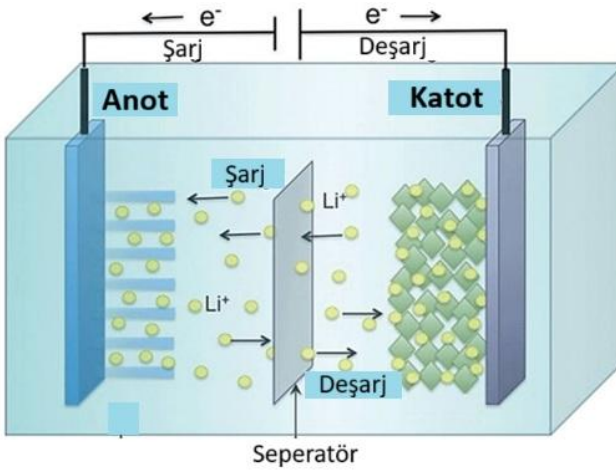
¹ Prof. Dr., Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Orcid: 0000-0002-4807-3909

1. GİRİŞ

Küreselleşme, dijitalleşme ve hızla büyüyen teknoloji ekosistemi, enerjiye duyulan ihtiyacı tarihte görülmemiş ölçüde artırmıştır. Özellikle mobiliteye dayalı yaşam tarzının yaygınlaşması, yüksek enerji yoğunluğuna sahip, güvenilir ve hafif enerji depolama çözümlerini zorunlu hâle getirmiştir. Akıllı telefonlardan taşınabilir tıbbi cihazlara, insansız hava araçlarından elektrikli taşıtlara kadar uzanan geniş bir uygulama alanı, enerji depolama teknolojilerinin performansını küresel ölçekte stratejik bir parametre hâline getirmektedir. Bununla birlikte fosil yakıt tüketiminin iklim üzerindeki etkileri ve karbon azaltım hedefleri, batarya tabanlı elektrikli araç teknolojilerini sürdürülebilir ulaşımın merkezine yerleştirmiştir(Njema et al., 2024).

Bu dönüşümün arkasındaki temel itici güç, yüksek enerji yoğunluğu, uzun çevrim ömrü ve yüksek verimliliği sayesinde günümüzün baskın enerji depolama platformu olan lityum-iyon pillerdir. Li-iyon piller hem taşınabilir elektroniklerde hem de elektrikli araçlarda güvenilir performans sunmaları nedeniyle dünya çapında tercih edilen bir teknoloji hâline gelmiştir. Bu başarının temelinde, yapısal olarak hafif lityumun kimyasal kararlılığı, yüksek hücre voltajı ve geniş malzeme mühendisliği seçenekleri bulunmaktadır(Azam et al., 2021).

Li-iyon piller temel olarak dört ana bileşenden oluşur: anot, katot, elektrolit ve ayırıcı (separator). Çalışma prensibi, şarj sırasında lityum iyonlarının katottan elektrolit aracılığıyla anoda göç etmesi ve anotda depolanması; deşarj sırasında ise ters yönde hareket ederek elektriksel enerji üretmesi esasına dayanır. Bu iyonik hareketlilik, anot ve katot malzemelerinin kristal yapısı, iyon difüzyon yolları, iletkenlikleri ve çevrim boyunca yapısal stabiliteyi ile doğrudan ilişkilidir(Toçoğlu et al., 2020a). Şekil 1 geleneksel bir Li-iyon pil hücreni göstermektedir.



Şekil 1. Li-iyon pil bileşenleri (Ghiji et al., 2020)

Li-iyon pillerde anot malzemesi olarak geleneksel grafit en yaygın seçenektir; düşük maliyet, kararlı SEI oluşumu ve uzun çevrim ömrü en önemli avantajlarıdır. Ancak grafit, 372 mAh g⁻¹ teorik kapasitesiyle yüksek enerji yoğunluğu gerektiren yeni nesil uygulamalarda sınırlayıcı bir bileşen hâline gelmiştir. Bu nedenle alaşımlanma ve dönüşüm mekanizmasına dayalı alternatif anot malzemeleri –örneğin silikon, kalay, germanium, titanatlar ve çeşitli metal oksitler– yoğun bir şekilde araştırılmaktadır. Silikon, son derece yüksek kapasite sunmasına rağmen yüksek hacim genişlemesi nedeniyle mekanik kararlılık açısından zorluk taşır. Metal oksitler dönüşüm mekanizması sayesinde yüksek kapasite sağlar ancak genellikle büyük ilk çevrim kayıpları ve düşük iletkenlik sorunu görülür. Alaşımlanma tipi anotlar ise karbon sistemlerine kıyasla çok daha yüksek kapasitelere ulaşabilirken hacim değişimi, elektroda bağlılık ve SEI stabilitesi açısından sınırlamalar barındırır(Hemavathi et al., 2023).

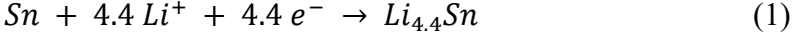
Bu alternatifler içinde kalay (Sn), yüksek teorik kapasitesi ($\approx 992 \text{ mAh g}^{-1}$), uygun işletim potansiyeli, düşük toksisite ve göreceli olarak kolay işlenebilmesi gibi özellikler sayesinde dikkat çekici bir adaydır. Ayrıca kalayın lityumla alaşımlanma reaksiyonları oldukça hızlıdır ve kinetik açıdan avantaj sağlar. Bununla birlikte Sn'in lityumla alaşımlanma sürecinde yaşadığı yüksek hacim genişlemesi (%250'nin üzerinde), partikül parçalanmasına, elektriksel temas kaybına ve SEI tabakasının sürekli bozulmasına yol açarak çevrim kararlılığını sınırlar. Bu nedenle kalay esaslı anot malzemelerinin performansı büyük ölçüde nano yapı mühendisliği, karbon kompozit tasarımı, alaşım oluşturma stratejileri ve hetero yapı stabilizasyonu gibi gelişmiş malzeme tasarım yaklaşımlarına bağlıdır(Alaf, 2023; Toçoğlu et al., 2020b).

Kalay, grafitte göre çok daha yüksek kapasite potansiyeli sunan, silikon kadar ekstrem hacim genişlemesi göstermeyen ve üretimi nispeten kolay bir anot adayı olarak Li-iyon pil araştırmalarında önemli bir konuma sahiptir. Bu bölümde kalay esaslı anot malzemelerinin kimyasal davranışı, yapısal sorunları ve performans artırma stratejileri ayrıntılı olarak ele alınacaktır(Alaf et al., 2013b).

2. KALAYIN LİTYUM İLE ALAŞIMLANMA MEKANİZMASI

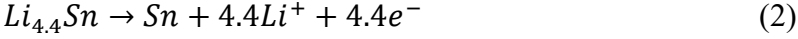
Kalayın Li-iyon pillerde anot olarak kullanılmasını mümkün kılan temel süreç, lityum ile çok kademeli alaşımlanma–dealaşımlanma mekanizmasıdır. Grafit gibi arayer (interkalasyon) yoluyla lityum depolayan sistemlerin aksine, Sn doğrudan gerçek kimyasal faz dönüşümlerine uğrar ve bu nedenle lityum depolama kapasitesi oldukça yüksektir. Şarj sırasında katottan ayrılan Li⁺ iyonları elektrolit boyunca anoda göç eder ve Sn kristal örgüsüne difüze olur. Bu difüzyonun ilk aşaması düşük lityum içerikli LixSn ara fazlarının oluşumudur. Sn'e yaklaşık 0.4–0.7 oranında Li'nin dahil olmasıyla Li_{0.4}Sn ve Li_{0.7}Sn gibi başlangıç fazları oluşur. Lityum miktarı arttıkça faz dönüşümü daha ileri seviyelere geçerek Li₂Sn₅, LiSn, Li₇Sn₃ ve Li₅Sn₂ gibi intermetalik bileşikler meydana gelir. Bu ardışık kimyasal dönüşümler, elektrokimyasal potansiyel

eğrisinde çoklu plato davranışı şeklinde gözlenir. Nihai aşamada, Sn atomları maksimum düzeyde Li çözerek $Li_{4.4}Sn$ fazına ulaşır. Bu reaksiyon,



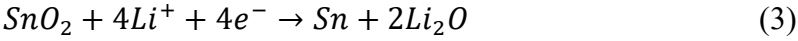
şeklinde ifade edilir ve Sn'in teorik kapasitesi olan yaklaşık 992 mAh g⁻¹ değerinin temelini oluşturur(M. Zhang et al., 2015).

Şarj süreci boyunca gerçekleşen bu ardışık alaşımlanma dönüşümleri, yüksek kapasite avantajı sağlasa da beraberinde ciddi yapısal zorlukları getirir. $Li_{4.4}Sn$ fazı, başlangıçtaki Sn fazına kıyasla yaklaşık %250–300 oranında daha büyük bir hacme sahiptir. Buna karşılık, Li iyonlarının anottan ayrılarak katoda döndüğü deşarj sürecinde reaksiyon basamakları tersine işler. Önce Li_5Sn_2 , ardından $LiSn$, Li_2Sn_5 ve daha düşük lityum içerikli $LixSn$ fazları çözülür. Süreç sonunda lityum tamamen anottan ayrılır ve reaksiyon,

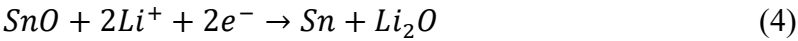


şeklinde tanımlanır. Bu dealaşımlanma sırasında fazlar yeniden Sn'e dönüşür; ancak sürekli genişleyip daralan kristal yapıda mekanik gerinim birikir, çatlaklar meydana gelir ve aktif malzeme parçalanmaya başlar. Bu pulverizasyon, anot ile akım toplayıcı arasındaki elektriksel bağlantının kaybına, elektron–iyon iletim yollarının bozulmasına ve çevrim ömrünün kışalmasına neden olur(Kebede, 2020).

SnO_2 ve SnO gibi oksit türevlerinin anot olarak kullanıldığı sistemlerde, alaşımlanma öncesinde dönüşüm reaksiyonları da gerçekleşir. SnO_2 için ilk reaksiyon,



şeklinde ve çoğu zaman geri dönüşümsüzdür. SnO için benzer bir davranış gözlenir:



Her iki durumda da ortaya çıkan Li_2O fazı, nanometre ölçekli Sn partiküllerinin gömülü olduğu bir matriks oluşturur. Bu nanoyapı daha sonra klasik Sn–Li alaşımlanma mekanizmasına katılır; ancak dönüşüm reaksiyonlarının yarattığı ek hacim artışı ve ilk çevrimdeki geri dönüşümsüz kapasite kaybı, oksit bazlı anotlarda önemli bir sınırlamadır(Zoller et al., 2019).

Alaşımlanma–dealaşımlanma döngüleri sırasında Sn yüzeyinde oluşan SEI (katı elektrolit ara fazı) tabakası da bu hacim değişiminden doğrudan etkilenir. Sn partikülleri her döngüde genişleyip daraldığı için SEI sürekli kırılır ve yeniden oluşur. Bu durum, elektrolitin hızlı şekilde tüketilmesine, iç direncin artmasına ve ilk çevrim coulombic veriminin düşmesine yol açar. SEI instabilitesi Sn bazlı anotların performansını sınırlayan başlıca mekanizmalardan biridir. Ayrıca

düzensiz SEI oluşumu, Li iyonlarının anot boyunca homojen olmayan dağılımına neden olarak yerel gerinim bölgeleri oluşturur ve mekanik parçalanmayı daha da hızlandırır(M. Zhang et al., 2015).

Tüm bu reaksiyonlar, kalay esaslı anotların hem güçlü hem de zayıf taraflarını ortaya koyar. Bir yandan Sn'in lityumla güçlü şekilde alaşımlanabilmesi yüksek kapasite, düşük çalışma potansiyeli ve hızlı kinetik sunarken; diğer yandan bu mekanizmanın doğası gereği oluşan büyük hacim genişlemesi, partikül kırılması, iletkenlik kaybı ve SEI kararsızlığı ciddi mühendislik sorunları ortaya çıkarır. Bu nedenle Sn bazlı anotların başarılı bir şekilde kullanılabilmesi, bu alaşımlanma mekanizmasının getirdiği yapısal ve elektrokimyasal dezavantajları yönetebilecek gelişmiş malzeme tasarımı yaklaşımlarının geliştirilmesine bağlıdır(Y. Li et al., 2021).

3. KALAY ESASLI ANOTLARDA TEMEL PROBLEMLER

Kalay esaslı anotların lityum-iyon piller için sunduğu yüksek teorik kapasite ve uygun çalışma potansiyeline rağmen, pratik hücre tasarımında yaygın ve kararlı şekilde kullanılmalarının önünde bir dizi yapısal ve elektrokimyasal engel bulunmaktadır. Bu engellerin büyük bölümü, önceki bölümde ayrıntılı olarak açıklanan çok kademeli alaşımlanma–dealaşımlanma mekanizmasının doğrudan bir sonucudur. Sn'in Li ile reaksiyonu sırasında meydana gelen büyük hacim değişimi, mekanik parçalanma, iletkenlik kaybı ve SEI instabilitesi gibi süreçleri tetiklemekte; bu da çevrim ömrü, kapasite tutulumu ve coulombic verim açısından önemli sınırlamalar oluşturmaktadır.

Kalay esaslı anotların en temel problemi, lityumla alaşımlanma sürecinde ortaya çıkan yüksek hacim genleşmesidir. $\text{Sn} \rightarrow \text{Li}_{4.4}\text{Sn}$ dönüşümü sırasında hacim yaklaşık %250–300 oranında artmakta, dealaşımlanma esnasında ise yeniden küçülmektedir. Bu ardışık genişleme–büzülme döngüleri, Sn partiküllerinde yoğun çekme ve basma gerilmelerinin birikmesine neden olur. Özellikle mikrometre boyutlu partiküllerde bu gerilmeler, kritik dayanım sınırını aşarak çatlak oluşumu, parçalanma (pulverizasyon) ve parçaların elektrot matriksinden ayrılmasıyla sonuçlanır. Nanoyapıların kullanımı bu gerilimi daha homojen dağıtarak kısmen hafifletse de hacim değişimi tamamen ortadan kalkmadığı için problem kökten çözülmüş sayılmaz(B. Zhang et al., 2011).

Mekanik degradasyon, elektrot ölçeğinde elektriksel sürekliliğin bozulması ile birleştiğinde daha ciddi sonuçlar doğurur. Parçalanan Sn partikülleri, iletken karbon katkıları ve akım toplayıcıyla olan fiziksel temasını kaybederek “elektriksel olarak izole” hâle gelir. Bu bölgeler elektrokimyasal olarak aktif olsalar bile, elektron iletim yolu kesildiği için hücre reaksiyonlarına katılamazlar ve efektif kapasiteyi düşürürler. Çevrim sayısı arttıkça aktif malzeme miktarı nominal olarak sabit kalsa bile, aktif olarak kullanılabilen fraksiyon azalır ve kapasite çok hızlı bir şekilde geriler. Bu durum literatürde “elektrot deactivate

olması” veya aktif malzemenin progresif kaybı şeklinde tanımlanır.(Jia et al., 2018)

Kalay esaslı anotların bir diğer kritik sorunu, SEI (Solid Electrolyte Interphase) tabakasının kararsızlığıdır. Organik elektrolitler ve lityum tuzları, Sn yüzeyinde düşük potansiyellerde indirgenerek SEI adı verilen ince bir ara faz tabakası oluşturur. Kararlı bir SEI tabakası, elektrolitin daha fazla indirgenmesini engelleyerek hem elektrotu korur hem de hücrenin uzun ömürlü olmasını sağlar. Ancak Sn partiküllerinin her çevrimde ciddi oranda genişleyip daralması, bu tabakanın bütünlüğünü sürekli bozar. SEI’nin tekrarlı olarak kırılması, yeni yüzeylerin açığa çıkması ve bu yüzeylerde elektrolit indirgenmesinin devam etmesi sonucunda elektrolit tüketimi artar, iç direnç yükselir ve özellikle ilk birkaç çevrimde yüksek geri dönüşümsüz kapasite kaybı gözlenir. Bu süreç, coulombic verimin başlangıçta düşük seyretmesine ve sistemin enerji verimliliğinin azalmasına neden olur.

SEI instabilitesine ek olarak, kalay esaslı anotlarda homojen olmayan lityum dağılımı da önemli bir problemidir. Alaşımın ve dealaşımın sırasında lityum, partikül içinde her zaman eşit dağılmayabilir; bu durumda lokal gerinim alanları oluşur ve bazı bölgeler aşırı lityumlanırken diğerleri nispeten daha düşük lityum içerir. Bu heterojenlik, çatlak oluşumunu hızlandırır, faz sınırlarında gerilim yoğunlaşmasına neden olur ve parçalanmayı daha da şiddetlendirir. Özellikle SnO₂ ve SnO gibi dönüşüm tipi sistemlerde, Li₂O matrisi içinde dağılmış nanometre boyutlu Sn fazları ile çevrimler boyunca yeniden organize olan mikro yapı, hem avantaj (gerinim tamponlama) hem de dezavantaj (faz ayrışması ve yol kaybı) yaratabilir.

Bir başka önemli sınırlama, elektriksel ve iyonik iletkenlik ile ilgilidir. Metalik Sn yüksek elektriksel iletkenliğe sahip olsa da, pratik elektrot yapısında Sn yalnız başına bulunmaz; bağlayıcı, karbon katkısı ve oksit fazları ile birlikte karmaşık bir kompozit yapı oluşturur. SnO₂ ve SnO gibi oksit türevleri doğaları gereği daha düşük elektronik iletkenliğe sahiptir. Ayrıca parçalanma sonucu oluşan küçük Sn kümeleri, iletken karbon ağıyla temasını kaybederse yüksek teorik kapasitelerine rağmen devre dışı kalırlar. Bu nedenle, kalay esaslı anotlarda hem elektron hem de lityum iyonu iletkenliğini sürdürülebilir kılacak sürekli bir iletim ağı oluşturmak büyük önem taşır. Yeterli iletkenlik sağlanmadığı durumda, özellikle yüksek akım yoğunluklarında polarizasyon artar, gerilim düşümü belirginleşir ve efektif kapasite ciddi şekilde azalır.

Kalay esaslı sistemlerde özellikle oksit bazlı anotlarda karşılaşılan bir diğer problem, yüksek ilk çevrim kapasite kaybıdır. SnO₂ ve SnO içeren anotlarda, ilk lityumlanma sırasında gerçekleşen dönüşüm reaksiyonlarında oluşan Li₂O fazı çoğunlukla elektrokimyasal olarak geri dönüşümsüzdür. Bu durum, teorik kapasitenin önemli bir bölümünün ilk çevrimde “kilitlenmesi” anlamına gelir. Li₂O matrisi, sonraki çevrimlerde bir tampon faz olarak mekanik avantaj

sağlayabilse de kapasite açısından bakıldığında bu faz, aktif lityumun bir kısmını kullanılmaz hâle getirir. Bu da özellikle tam hücre konfigürasyonlarında katot/anot kapasite dengelemesini zorlaştırır ve tasarım aşamasında ek önlemler gerektirir (Liu et al., 2019).

Bütün bu yapısal ve elektrokimyasal problemler, kalay esaslı anot malzemelerinin pratik uygulamalarını sınırlayan temel faktörlerdir. Hacim genişmesi, mekanik parçalanma ve SEI kararsızlığı birbirini besleyen, ayrıştırılması güç bir problem üçgeni oluşturur. Elektriksel ve iyonik iletkenlik kaybı ise bu üçgene eklenerek yüksek akım yoğunluğu altında performansın daha da düşmesine yol açar. Bu nedenle kalay esaslı anotların uygulanabilirliğini artırmak, tek bir parametreye odaklanmakla değil; yapısal tasarım, malzeme bileşimi, elektrot mimarisi ve elektrolit kimyasının birlikte optimize edilmesi ile mümkündür. Takip eden bölümlerde, bu temel problemlerin aşılarda kalay esaslı anotların yüksek kapasite potansiyelinin nasıl daha kararlı bir şekilde kullanıma aktarılabilceği, farklı malzeme stratejileri çerçevesinde ayrıntılı olarak tartışılacaktır (J. Li et al., 2022).

4. KALAY ESASLI ANOTLARDA YAPISAL TASARIM VE GELİŞTİRME STRATEJİLERİ

Kalay esaslı anot malzemelerinde karşılaşılan yapısal ve elektrokimyasal zorluklar—hacim değişimi, partikül parçalanması, SEI stabilitesinin bozulması ve iletkenlik kaybı—yalnızca temel malzeme özelliklerine değil, aynı zamanda elektrot mimarisine ve mikro yapı tasarımına da doğrudan bağlıdır. Bu nedenle literatürde Sn temelli anotların uzun çevrim ömrü ve yüksek kapasite tutulumuyla çalışabilmesi için çeşitli yapısal mühendislik stratejileri geliştirilmiştir. Bu stratejiler, kalayın lityumla alaşımlanma mekanizmasının doğurduğu mekanik ve kimyasal sorunları malzeme tasarımının farklı seviyelerinde kontrol altına almayı hedefler (Roy & Srivastava, 2015).

Bu bölümde ele alınan yöntemler; nanoyapı tasarımı, karbon kaplama ve karbon matris kompozitleri, metal oksit–metal hibrit yapıları, alaşım oluşturma yaklaşımları ve kendinden destekli elektrot mimarileri gibi çok yönlü çözümleri kapsamaktadır. Bu yaklaşımların ortak amacı, Sn'in hacim değişimini tamponlamak, SEI tabakasının stabil kalmasını sağlamak, elektron ve iyon iletkenliğini artırmak ve aktif malzemenin çevrimler boyunca yapısal bütünlüğünü korumaktır. Literatürdeki çalışmalar, bu stratejilerin tek başına veya birlikte uygulanmasıyla, konvansiyonel Sn anotlara kıyasla çok daha yüksek döngü stabilitesi, düşük polarizasyon ve iyileştirilmiş kapasite korunumu elde edildiğini göstermektedir.

4.1. Nanoyapı Tasarımı

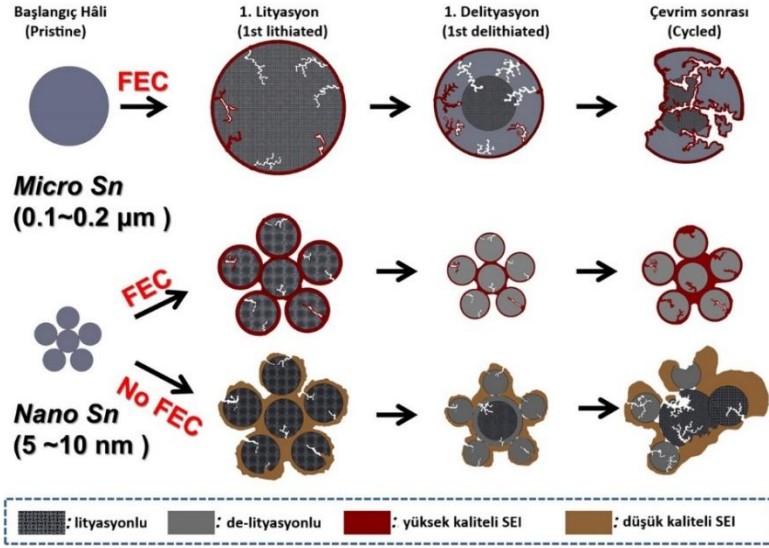
Kalay esaslı anotlarda yapısal kararlılığı artırmanın en doğrudan yollarından biri, malzemenin nanoyapı düzeyinde yeniden tasarlanmasıdır. Hacim değişimini

tek parça, mikrometre boyutlu taneler yerine; çok sayıda, birbirinden kısmen bağımsız hareket edebilen nano-alt birimlere dağıtmak, gerilme yığılmalarını azaltmak ve pulverizasyonu geciktirmek için temel bir yaklaşımdır. Bu amaçla literatürde; Sn nanoparçacıkları, nanokümeler, nano-levhalar, boşluklu (hollow/yolk-shell) yapılar ve 3B iletken iskeletler gibi çok farklı mimarilerin geliştirildiği görülmektedir. Bu nanoyapıların ortak paydası, lityum alışımlanması sırasında ortaya çıkan hacim genleşmesini “iç boşluklar” ve esnek arabirimler yardımıyla absorbe etmeleri ve aynı anda elektron/iyon taşınım yollarını korumaya çalışmalarıdır(Roy & Srivastava, 2015).

Kong ve ark. bu yaklaşımı ileri bir düzeye taşıyarak, fosforla modifiye edilmiş Sn nanokümelerinin azot katkılı grafen tarafından kapsüllendiği (P-Sn/NG) bir yapı tasarlamıştır. Fosfor modifikasyonu, Sn nanokümelerinin nano/mikro ölçekli birincil partiküller şeklinde organize olmasını sağlayarak, malzemenin iç yapısında çok kademeli bir tamponlama mekanizması oluşturmuştur. Aynı zamanda arabirimin amorf hâle getirilmesiyle, SEI oluşumunun daha kararlı bir bölgede ve daha homojen gerçekleştiği rapor edilmiştir. Bu sayede lityum iyonlarının geçişi hızlanırken, SEI tabakasının çatlayıp yeniden oluşması sınırlandırılmış; ilk çevrim coulombic veriminin ortalama %82,2’ye yükseldiği belirtilmiştir. P-Sn/NG elektrot, yarı hücre konfigürasyonunda 5,0 A g⁻¹ akım yoğunluğunda 3200 çevrim sonunda dahi 620,4 mAh g⁻¹ kapasiteyi koruyarak, yalnızca nanoyapı optimizasyonu ve arayüz mühendisliğinin bile kalay esaslı anotların uzun çevrim ömrü açısından ne kadar kritik olduğunu göstermiştir. Bu çalışma, Sn nanokümelerinin iletken ve esnek bir grafen ağı içinde hapsedilmesinin, hem hacim genleşmesiyle ilişkili mekanik yıkımı bastırdığını hem de SEI stabilitesini artırdığını ortaya koyan tipik bir örnektir(Kong et al., 2022).

Nanoyapı tasarımında yalnızca parçacık boyutu değil, SEI ölçeği de “nano” düzeye çekildiğinde sistemin kararlılığı belirgin biçimde artabilmektedir. Eom ve ark. tarafından gerçekleştirilen çalışmada, maliyeti artıran karmaşık ön işlemlere başvurulmadan, konvansiyonel yöntemlerle üretilmiş nano boyutlu çıplak Sn elektrotlar, elektrolite fluoroetilen karbonat (FEC) katkısı eklenerek incelenmiştir. FEC katkısı, şarj-deşarj döngülerinin ilk aşamalarında Sn yüzeyinde daha ince, düşük dirençli ve yüksek pasivasyon kabiliyetine sahip bir nano-SEI tabakası oluşmasını sağlamış; bu yüksek kaliteli SEI, nano-Sn elektrotlarda kapasite kaybını önemli ölçüde azaltmıştır. Çalışmada, FEC içeren elektrolitte çalışan nano-Sn elektrotların yaklaşık 320 mAh g⁻¹ kapasitede (1,3C akım yoğunluğunda) 150 çevrim boyunca çevrim başına yalnızca %0,014 kapasite kaybı gösterdiği ve böylece oldukça kararlı bir çevrim davranımına ulaştığı rapor edilmiştir. Aynı etkinin mikrometre boyutlu Sn partiküllerinde gözlenmemesi, nanoyapı tasarımının SEI kalitesiyle birlikte düşünülmesi gerektiğini açık biçimde ortaya koymaktadır; uzun difüzyon yolları ve daha şiddetli hacim genleşmesi, mikro boyutlu Sn’de SEI iyileştirmesinin tek başına

yeterli olmadığını göstermektedir(Eom et al., 2015). Bu yapı–performans ilişkisi, Şekil 2’de şematik olarak açıkça gösterilmiştir. Şekilde, mikro ve nano ölçekli Sn parçacıklarının ilk lityasyon–delityasyon döngülerindeki ve çoklu çevrim sonrası durumlarındaki yapısal evrimleri karşılaştırılmaktadır.



Şekil 2. Micro- ve nano-boyutlu Sn parçacıklarında FEC katkısının SEI oluşumu ve döngü degradasyonuna etkisinin şematik gösterimi(Eom et al., 2015).

Nanoyapı tasarımının basit bir “boyut küçültme” yaklaşımından ibaret olmadığı; parçacık boyutu, morfoloji, iç boşluklar, arayüz özellikleri ve iletken iskelet yapısının birlikte tasarlanmasını gerektiren çok parametrelili bir konu olduğu görülmektedir. Literatür genelinde bildirilen bulgular, nanoyapı optimizasyonunun yalnızca yüksek ilk kapasite sağlamak için değil, aynı zamanda yüksek akım yoğunluklarında kapasite korunumu, uzun çevrim ömrü ve düşük polarizasyon elde edilmesi için de kritik rol oynadığını göstermektedir.

4.2. Karbon Kaplama ve Karbon Matris Kompozitleri

Kalay esaslı anotlarda karbon; yalnızca iletken katkı değil, aynı zamanda mekanik tampon, yapısal iskelet ve SEI düzenleyici ortam olarak işlev görür. Sn veya SnO₂ nano/alt-mikron parçacıklarının karbon matris içinde dağınık hâlde tutulması, hacim genişlemesinin lokal olarak soğurulmasına, gerilmenin parçacık–parçacık arayüzlerine yayılmasına ve sürekli bir elektron iletim ağı oluşmasına imkân verir. Böylece hem pulverizasyonun hızı düşer, hem de tekrarlı SEI kırılması–yeniden oluşması sınırlanır. Karbonun amorf, grafitik, gözenekli veya 3B iskelet formunda kullanılması; Sn fazının morfolojisi, dağılımı ve efektif kullanılabilir kapasitesi üzerinde belirleyici olmaktadır.

Alaf ve Akbulut’un çalışması, karbon nanotüp iskeletine dayalı kompozit tasarımın kalay esaslı anotlarda ne kadar etkili olabileceğini göstermektedir.

Çalışmada çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) buckypaper üzerine, termal buharlaştırma ve plazma oksidasyonu ile Sn/SnO₂ çift fazlı nanokompozit filmler kaplanmış ve plazma süresiyle Sn/SnO₂ oranı kontrol edilmiştir. MWCNT ağı, hem yüksek elektriksel iletkenlik sağlayan sürekli bir yol, hem de Sn/SnO₂ kabuğunun alaşımlanma/de-alaşımlanma sırasında yaşadığı hacim değişimini tamponlayan esnek bir iskelet işlevi görmüştür. Böylece oluşturulan serbest duran Sn/SnO₂/MWCNT elektrotlar, morfolojik stabilite ve düşük difüzyon direnci sayesinde 100 çevrim sonunda yaklaşık 624 mAh g⁻¹ kapasiteyi korumuş, karbon nanotüp destekli 3B nano-ağ yapılarının kalay esaslı anotlar için güçlü bir yapısal tasarım yaklaşımı olduğunu net biçimde ortaya koymuştur (Alaf & Akbulut, 2014)

Karbon matris tasarımının bir başka varyasyonu olarak, CNT@SnO₂ ile dekore edilmiş grafen anotlar üzerine yapılan çalışmada, SnO₂'nin yüksek teorik kapasitesini korurken hacim genleşmesine bağlı pulverizasyonu sınırlayan hiyerarşik bir yapı elde edilmiştir. SnO₂ nanokristallerinin CNT yüzeyine ince bir kaplama şeklinde bağlanması ve bu CNT@SnO₂ birimlerinin grafen tabakaları arasında homojen biçimde yerleştirilmesi; SnO₂ aglomerasyonunu engellemiş, özgül yüzey alanını ve elektrokimyasal olarak aktif bölgeleri artırmış, aynı zamanda sürekli bir iletken ağ oluşturarak elektriksel iletkenliği iyileştirmiştir. Serbest duran ve esnek nitelikteki bu CNT@SnO₂/grafen kompozit anot, yüksek geri dönüşümlü kapasite, yüksek coulombic verim ve iyi kapasite tutulumu ile, karbon nanotüp–grafen hibrit matrislerinin SnO₂ esaslı anotlarda hem hacim genleşmesinin tamponlanması hem de uzun çevrim kararlılığının sağlanması açısından son derece etkili bir tasarım platformu sunduğunu ortaya koymaktadır (Alaf et al., 2023).

Karbon matrisli tasarımın bir diğer örneğinde, Güler ve çalışma arkadaşları hacim değişimi sorununu gidermek amacıyla yolk–shell tipinde Sn@C@grafen kompozit anotlar geliştirmiştir. Kimyasal indirgeme yöntemiyle yüksek saflıkta nanokristalin Sn parçacıkları sentezlenmiş; bu nano-Sn parçacıkları, çekirdek ile kabuk arasında boşluk bırakacak şekilde tasarlanan kendinden taşıyıcı (self-standing) karbon mimarisi içine gömülmüştür. Oluşturulan Sn@C partikülleri daha sonra Hummers yöntemiyle üretilmiş grafen tabakaları arasında dekore edilerek serbest duran ince grafen filmler hâlinde elektrotlar elde edilmiştir. Yolk–shell yapının iç boşluğu, lityasyon–delityasyon sırasında Sn çekirdeğinin hacim genleşmesini absorbe ederken, karbon kabuk ve grafen tabakaları sürekli bir iletken ağ ve mekanik destek sağlamıştır. Bu hiyerarşik Sn@C@grafen kompozit elektrotlar, 250 çevrim sonunda dahi yaklaşık 284,5 mAh g⁻¹ seviyesinde kararlı deşarj kapasitesi sunarak, grafenle güçlendirilmiş karbon kabuklu nanokristalin Sn çekirdeklerinin kalay esaslı anotlarda hacim genleşmesi kaynaklı bozulmayı sınırlayan etkili bir tasarım yaklaşımı olabileceğini göstermektedir (Guler et al., 2018).

Bu örnekler birlikte değerlendirildiğinde, karbon kaplama ve karbon matris kompozitlerinin Sn esaslı anotlarda üç temel işlevi öne çıkmaktadır: (i) hacim genişmesini absorbe eden elastik bir mekanik tampon oluşturmak, (ii) sürekli ve düşük dirençli bir elektron iletim ağı sağlayarak yüksek akım yoğunluklarında bile polarizasyonu sınırlamak, (iii) SEI oluşumunu kontrol ederek elektrolit bozunmasını ve aktif lityum tüketimini azaltmak. Literatürdeki karbon nanokompozitleri, bu tasarım ilkelerinin hem oksit-karbon hem de alaşım-karbon sistemlerinde uygulanabildiğini, uygun morfoloji ve karbon mimarisi seçildiğinde kalay esaslı anotların hem çevrim ömrü hem de volumetrik enerji yoğunluğu açısından grafiti anlamlı biçimde zorlayabildiğini ortaya koymaktadır.

4.3. Alaşım ve Oksit-Metal Hibrit Tasarımlar (Sn-M ve SnO₂/Sn Sistemleri)

Kalay esaslı anotların yapısal kararlılığını artırmaya yönelik bir diğer yaklaşım, Sn'in tek başına kullanılması yerine, alaşım ve hibrit faz tasarımı ile mikro yapı ve faz mühendisliği yapılmasıdır. Bu bağlamda iki ana strateji öne çıkmaktadır: (i) Sn'in Ni, Co, Fe, Cu gibi metallerle alaşım hâline getirildiği Sn-M sistemleri, (ii) dönüşüm reaksiyonları ile alaşımlanma mekanizmasını birleştiren SnO₂/Sn ve SnO/Sn tipi oksit-metal hibrit yapılar. Her iki yaklaşımda da temel amaç, lityasyon-delityasyon sırasında aktif Sn fazının hacim genişmesini, daha rijit veya yarı inaktif bir matris içinde "paylaştırarak" mekanik gerilmeyi düşürmek ve faz sınırlarını kontrollü hâle getirmektir.

Sn-Ni, Sn-Co, Sn-Fe ve Sn-Cu gibi alaşım sistemlerinde, Sn genellikle lityumla doğrudan alaşımlanan aktif faz konumundayken, M elementi (Ni, Co, Fe, Cu) daha çok yapısal matris ve iletken iskelet rolünü üstlenir. Lityasyon sırasında Sn-zengin intermetalik fazlar Li ile alaşımlanırken, M-zengin fazlar hacim değişimlerini karşılayan ve çatlak ilerlemesini yavaşlatan tampon bölgeler oluşturur. Bu sayede alaşım partikülleri içinde gerinim daha homojen dağılır; kırılma ve pulverizasyon kritik eşiklerin altında tutulabilir. Sn-Ni ve Sn-Co sistemleri, sert ve iletken intermetalik fazlar sayesinde elektron iletim yollarını korurken, Sn-Fe ve Sn-Cu alaşımları, özellikle volumetrik kapasite ve mekanik dayanım arasında denge kurma açısından öne çıkar. Gravimetrik kapasite saf Sn'e göre bir miktar azalsa da, çevrim ömrü ve kapasite korunumu anlamlı düzeyde iyileşir ve pratik hücre tasarımında çok daha kullanılabilir bir performans penceresi elde edilir(Gao et al., 2017; Lin et al., 2021; Yi et al., 2018).

Oksit-metal hibrit tasarımlarında ise Sn, başlangıçta SnO₂ veya SnO formunda bulunur ve lityumla ilk temasında önce dönüşüm reaksiyonu ile metalik Sn ve Li₂O matrisi oluşur; sonraki aşamada bu metalik Sn, Li ile alaşımlanma-dealaşımlanma döngülerine girer. SnO₂/Sn veya SnO/Sn gibi hibrit yapılarda bu iki adım aynı yapıda birlikte mühendislik konusu hâline getirilir. Dönüşüm reaksiyonu sırasında oluşan Li₂O, elektro kimyasal olarak genellikle inert kalsa da, nanometre boyutlu Sn fazlarını çevreleyen bir matriks görevi görerek hacim

genleşmesini kısmen tamponlar ve Sn'nin tamamen aglomere olmasını engeller. SnO_2/Sn çekirdek-kabuk veya karışık fazlı nanopartiküllerde, dış kabukta SnO_2 , içte ya da ara bölgede Sn fazı bulunabilir; lityum depolaması sırasında önce $\text{SnO}_2 \rightarrow \text{Sn} + \text{Li}_2\text{O}$ dönüşümü, ardından $\text{Sn} \rightarrow \text{Li-Sn}$ alaşımlanması gerçekleşir. Bu hibrit yapı, aktif Sn'nin Li_2O matrisi ve/veya kalan oksit fazları tarafından nano ölçekte hapsedilmesini (nanoconfinement) sağlayarak hem pulverizasyonu baskılar hem de faz sınırlarını daha kararlı hâle getirir (Kamboj et al., 2022; Kravchyk et al., 2013).

Alaşımlar temelli Sn-M sistemleri ve SnO_2/Sn tipindeki oksit-metal hibritler genellikle karbon matrisleriyle birlikte kullanıldığında en etkili hâle gelmektedir (Fan et al., 2021). Bu durumda tasarım çok kademeli bir hâl alır: atomik ve faz düzeyinde alaşımlar/hibrit mühendisliği, parçacık düzeyinde nanoyapı tasarımı ve elektrot düzeyinde karbon iskelet veya film yapıları aynı anda devrededir. Sn-Ni, Sn-Co, Sn-Fe ve Sn-Cu alaşımları ile SnO_2/Sn hibritleri, hacim genleşmesini tek bir fazın taşıdığı “zayıf halkalı” yapılardan farklı olarak, gerinimi birden fazla faz ve arayüz arasında dağıtan çok fazlı, kontrollü mikro yapılar oluşturarak kalay esaslı anotların döngü kararlılığını önemli ölçüde artırma potansiyeli taşımaktadır. Bu nedenle alaşımlar ve oksit-metal hibrit tasarımları, nanoyapı mühendisliği ve karbon kompozitleriyle birlikte düşünüldüğünde, Sn tabanlı anotların uzun ömürlü ve yüksek performanslı Li-iyon pillerde kullanılabilmesi için kritik bir faz mühendisliği aracı olarak öne çıkmaktadır.

4.4. Kendinden Destekli Elektrot Tasarımları

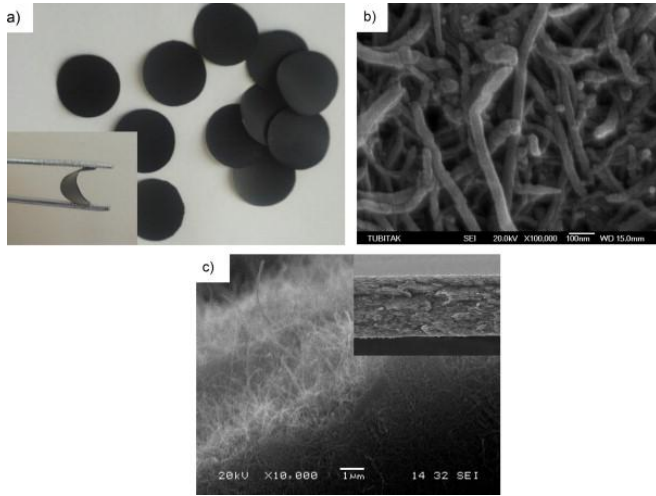
Kalay esaslı anotlarda bağlayıcı ve metal akım toplayıcı kullanımını en aza indiren ya da tamamen ortadan kaldıran kendinden destekli (freestanding) elektrot tasarımları, hem özgül enerji yoğunluğunu artırmak hem de hacim genleşmesine bağlı yapısal bozulmaları azaltmak için önemli bir yaklaşım hâline gelmiştir. Bu tür yapılarda aktif faz, kendi içinde veya iletken bir karbon iskelet üzerinde mekanik olarak stabil, esnek ve iletken bir ağ oluşturarak hem akım toplayıcı hem de bağlayıcı görevini üstlenir. Böylece elektrot kütlesi içindeki “ölü hacim” azalır, elektron ve iyon taşınım yolları kısalır ve yüksek akım yoğunluklarında dahi daha kararlı bir elektrokimyasal davranış elde edilebilir.

Bu kapsamda Chen ve arkadaşları, ekolojik açıdan görece basit bir prosesle ürettikleri 3B grafen aerogellerini bağlayıcısız, serbest duran ve elastik anot iskeletleri olarak kullanmış; daha sonra bu iskelet üzerine SnO_2 nanoparçacıklarını homojen biçimde dağıtmıştır. Düşük sıcaklıkta (75 °C) kendi kendine düzenlenme ile elde edilen grafen aerogel ağı, indirgenmiş grafen tabakaları üzerinde eşit dağılmış SnO_2 nanoparçacıklarıyla birlikte yüksek tersinir kapasite, üstün çevrim kararlılığı ve iyi hız performansı sağlamıştır. Özellikle 600 °C'de tavlama sonrası oluşan Sn-C-O bağlarının, SnO_2 ile grafen arasında güçlü bir kimyasal ara yüz oluşturarak sinerjik bir etki yarattığı ve

kompozitin elektrokimyasal performansını belirgin biçimde iyileştirdiği gösterilmiştir. Böylece 3B grafen aerogeller, hem mekanik taşıyıcı hem de yüksek iletkenlik sunan bir ağ olarak, SnO₂ temelli freestanding anotların tasarımı için etkili bir platform ortaya koymuştur(Chen et al., 2016).

Wang ve çalışma arkadaşları ise kendinden destekli mimariyi iyonik sıvı destekli elektro eğirme (electrospinning) yöntemiyle üretilen Sn@mezo-gözenekli karbon nanolifler (Sn@MCNF-IL) üzerinde göstermiştir. İyonik sıvı (AminCl) ile modifiye edilen SnO₂ parçacıkları, elektro eğirme çözeltisiyle daha uyumlu bir ara yüz oluşturarak sonrasında pirolizle mezo-gözenekli karbon lifler içinde son derece uniform şekilde kapsüllenmiş Sn nanoçekirdekleri ortaya çıkarmıştır. Bu hiyerarşik yapı, Sn nanoparçacıklarının lif içinde kontrolsüz aglomerasyonunu engellemiş, hacim genişlemesinden kaynaklı gerilmeleri lif kanalları boyunca dağıtmış ve lityum depolama için yüksek yüzey alanı sunmuştur. Sn@MCNF-IL anotları, 0,5 A g⁻¹ akım yoğunluğunda yaklaşık 750 mAh g⁻¹ kapasite, 800 çevrim sonunda ise ~504 mAh g⁻¹ düzeyinde kararlı kapasite ile, klasik Sn@CNF elektrotlara göre hem çevrim ömrü hem de hız performansı açısından belirgin üstünlük sergilemiştir. Bu sonuçlar, esnek karbon nanolif ağları içinde kapsüllenmiş Sn nanoçekirdeklerinin, kendinden destekli anot tasarımında son derece etkili bir geometri sunduğunu göstermektedir(Wang et al., 2021).

Kendinden destekli tasarımların bir diğer önemli örneği Alaf ve arkadaşlarının çalışmasında ele alınan Sn/SnO₂/MWCNT buckypaper elektrotlardır. Bu çalışmada, fonksiyonelleştirilmiş çok duvarlı karbon nanotüplerden (MWCNT) vakum filtrasyon yoluyla gözenekliliği kontrol edilen serbest duran buckypaper'lar hazırlanmış; ardından bu esnek karbon kâğıtlar üzerine, termal buharlaştırma ve RF plazma oksidasyonu adımlarıyla Sn/SnO₂ çift fazlı nanokompozit kaplamalar uygulanmıştır. Plazma oksidasyon süresi ayarlanarak Sn/SnO₂ oranı kontrol edilmiş, evaporasyonla biriktirilen Sn nanokristalleri buckypaper gözeneklerine mekanik olarak nüfuz ederek fonksiyonel gradyanlı bir Sn/SnO₂/MWCNT yapısı oluşturmuştur. Hazırlanan serbest duran nanokompozit elektrotlar, yüksek özgül deşarj kapasitesi ve çok kararlı çevrim davranışı sergilemiş; gradyan yapı sayesinde gerilme dağılımının iyileştiği ve pulverizasyonun belirgin biçimde baskılandığı gösterilmiştir. Şekil 3'te, bu buckypaper tabanlı mimarinin serbest duran yapısı ile yüzey ve kesit FE-SEM görüntüleri verilmekte; MWCNT ağının hem yüksek gözeneklilik hem de mekanik süreklilik sağlayan taşıyıcı bir iskelet olarak davrandığı açıkça görülmektedir(Alaf et al., 2013a).



Şekil 3. (a) Esnek, serbest duran MWCNT buckypaper'lar, (b) buckypaper'ın yüzeyinden alınan FE-SEM görüntüsü ve (c) kesit bölgesinden alınan FE-SEM görüntüsü(Alaf et al., 2013a).

Genel olarak bu çalışmalar, kendinden destekli elektrot tasarımlarında ortak üç temel ilkeyi ortaya koymaktadır: (i) elastik ve iletken bir 3B karbon iskelet (grafen aerogel, mezo-gözenekli karbon nanolifler, MWCNT buckypaper vb.) üzerinden aktif Sn/SnO₂ fazlarının taşınması, (ii) hacim genleşmesinin bu iskelet içinde boşluklar ve kanallar boyunca dağıtılması, (iii) bağlayıcı ve metal akım toplayıcı ihtiyacının azaltılarak aktif malzeme oranının artırılması. Bu sayede kalay esaslı anotlar, hem mekanik açıdan esnek ve serbest duran yapılar hâline gelirken, hem de yüksek kapasite, uzun çevrim ömrü ve iyi hız performansını bir arada sunabilen ileri nesil elektrot mimarilerine dönüşmektedir.

5. SONUÇ VE GELECEĞE YÖNELİK PERSPEKTİFLER

Lityum-iyon piller, yüksek enerji yoğunluğu, uzun çevrim ömrü ve tasarım esnekliği sayesinde günümüzün baskın enerji depolama teknolojisi hâline gelmiştir. Bu başarının sürdürülebilmesi ve daha da ileri taşınabilmesi, özellikle anot tarafında grafit gibi geleneksel malzemelerin ötesine geçilmesine bağlıdır. Bu bağlamda kalay, yüksek teorik kapasitesi, uygun çalışma potansiyeli ve nispeten iyi işlenebilirliği ile öne çıkan alaşımlanma tipi bir anot adayıdır. Ancak Sn'in Li ile çok kademeli alaşımlanma-dealaşımlanma mekanizması, beraberinde büyük hacim genleşmesi, mekanik parçalanma, SEI tabakası kararsızlığı ve iletkenlik kaybı gibi ciddi zorluklar getirmektedir. Bu çalışma kapsamında, kalay esaslı anotların bu temel problemleri ve bunlara yönelik yapısal tasarım stratejileri bütüncül bir bakış açısıyla ele alınmıştır.

Sunulan tartışmalar, tek başına malzeme bileşiminin değiştirilmesinin yeterli olmadığını; nanoyapı tasarımı, karbon matris mühendisliği, alaşım ve oksit-metal hibrit faz tasarımı ile kendinden destekli elektrot mimarilerinin birlikte

değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Nanokümeler, hollow/yolk-shell yapılar ve 3B iletken iskeletler, hacim genişlemesini nano ölçekte boşluklar içinde soğurarak gerinim yığılmalarını azaltmakta; karbon kaplama ve karbon matris kompozitleri, hem mekanik tampon hem de sürekli elektron iletim ağı sağlayarak pulverizasyonu geciktirmektedir. Sn-M (Ni, Co, Fe, Cu vb.) alaşımları ve SnO₂/Sn gibi oksit-metal hibrit sistemleri, hacim değişimini çok fazlı bir mikro yapı içine dağıtarak faz sınırlarını kontrol altına almakta; kendinden destekli grafen aerogeller, karbon nanolifler ve MWCNT buckypaper yapıları ise akım toplayıcı ve bağlayıcıya duyulan ihtiyacı azaltarak aktif malzeme oranını artırmakta ve elektrot mimarisini sadeleştirmektedir. Bu çok ölçekli tasarım yaklaşımları sayesinde, literatürde Sn esaslı anotların yüzlerce çevrim boyunca anlamlı kapasite korunumu ve yüksek akım yoğunluklarında dahi iyileştirilmiş hız performansı sunduğu gösterilmiştir.

Geleceğe yönelik olarak, kalay esaslı anot araştırmalarında birkaç eksen özellikle öne çıkmaktadır. Bunlardan ilki, laboratuvar ölçeğindeki hücre performansının tam hücre ve modül seviyesine taşınmasıdır; yarı hücrelerde elde edilen yüksek kapasite değerlerinin, endüstriyel elektrot kalınlıkları, elektrot yüklemesi ve elektrolit miktarı dikkate alındığında nasıl evrileceği ayrıntılı olarak incelenmelidir. İkinci olarak, sıvı elektrolitler yanında katı hâl veya jel elektrolit sistemleriyle Sn tabanlı anotların etkileşimi, SEI oluşumu ve ara yüz stabilitesi açısından yeni fırsatlar sunmaktadır. Üçüncü olarak, operando karakterizasyon tekniklerinin (in-situ XRD, TEM, Raman vb.) kullanımı ile hacim genişmesi, faz dönüşümleri ve SEI evriminin gerçek zamanlı izlenmesi; geliştirilen tasarım stratejilerinin mekanizmalarını daha iyi anlamaya ve rasyonel optimizasyon yapmaya imkân verecektir. Son olarak, hesaplamalı malzeme bilimi ve makine öğrenmesi destekli tarama yaklaşımlarının, Sn alaşımlarında ve kompozit sistemlerde bileşim-mikroyapı-performans ilişkilerini hızlıca haritalandırarak yeni aday sistemlerin belirlenmesinde önemli bir araç hâline gelmesi beklenmektedir.

Bu çerçevede kalay esaslı anot malzemeleri, kısa vadede grafitin doğrudan yerine geçecek “hazır” bir çözüm olmaktan ziyade, ileri nesil, yüksek enerjili ve tasarımsal olarak özelleştirilmiş Li-iyon pil sistemlerinde güçlü bir alternatif bileşen olarak konumlanmaktadır. Uygun nanoyapı mühendisliği, faz tasarımı, elektrot mimarisi ve elektrolit optimizasyonu birlikte ele alındığında, Sn tabanlı anotların hem taşınabilir elektroniklerde hem de elektrikli araç uygulamalarında, özellikle yüksek enerji ve güç yoğunluğunun aynı anda talep edildiği senaryolarda, önemli bir rol üstlenebileceği öngörülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu kitabın hazırlanması sürecinde sağladıkları mali ve akademik destek için Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne (BŞEÜ BAP) teşekkür ederim. Çalışmada sunulan içerik ve elde edilen birikim, başta GAP-2024-558, 2017-01.BŞEÜ.03-01 ve 2018-01.BŞEÜ.03-05 numaralı BAP projeleri olmak üzere, yürütülen araştırma projeleri kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarla desteklenmiştir. Sağlanan bu destekler, kalay esaslı anot malzemeleri ve lityum-iyon pilleri alanındaki araştırmaların geliştirilmesine önemli katkı sağlamıştır.

KAYNAKLAR

- Alaf, M. (2023). The SnO₂ nanotube with CNT core structure (SnO₂@void@CNT) and graphene composite electrode for Li-ion batteries. *Thermal Science*, 27(4 Part B), 3217–3228. <https://doi.org/10.2298/TSCI2304217A>
- Alaf, M., & Akbulut, H. (2014). Electrochemical energy storage behavior of Sn/SnO₂ double phase nanocomposite anodes produced on the multiwalled carbon nanotube buckypapers for lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 247, 692–702.
- Alaf, M., Gultekin, D., & Akbulut, H. (2013a). Electrochemical properties of free-standing Sn/SnO₂/multi-walled carbon nano tube anode papers for Li-ion batteries. *Applied Surface Science*, 275, 244–251.
- Alaf, M., Gultekin, D., & Akbulut, H. (2013b). Tin/tin oxide (sn/sno₂) nanocomposites thin films as negative-electrode materials for li-ion batteries. *Acta Physica Polonica A*, 123(2), 323–325. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.123.323>
- Alaf, M., Oncel, V., Tocoglu, U., Ozbay, N., & Akbulut, H. (2023). Synthesis and characterization of CNT@SnO₂ decorated graphene anodes for Li-ion batteries as free-standing and flexible. *Journal of Materials Science* 2023 58:30, 58(30), 12298–12311. <https://doi.org/10.1007/S10853-023-08800-0>
- Azam, M. A., Safie, N. E., Ahmad, A. S., Yuza, N. A., & Zulkifli, N. S. A. (2021). Recent advances of silicon, carbon composites and tin oxide as new anode materials for lithium-ion battery: A comprehensive review. *Journal of Energy Storage*, 33, 102096. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2020.102096>
- Chen, Z., Li, H., Tian, R., Duan, H., Guo, Y., Chen, Y., Zhou, J., Zhang, C., Dugnani, R., & Liu, H. (2016). Three dimensional Graphene aerogels as binder-less, freestanding, elastic and high-performance electrodes for lithium-ion batteries. *Scientific Reports* 2016 6:1, 6(1), 27365-. <https://doi.org/10.1038/srep27365>
- Eom, K. S., Jung, J., Lee, J. T., Lair, V., Joshi, T., Lee, S. W., Lin, Z., & Fuller, T. F. (2015). Improved stability of nano-Sn electrode with high-quality nano-SEI formation for lithium ion battery. *Nano Energy*, 12, 314–321. <https://doi.org/10.1016/J.NANOEN.2014.12.041>
- Fan, B., Liu, J., Xu, Y., Tang, Q., Zhang, Y., Chen, X., & Hu, A. (2021). A facile strategy towards high capacity and stable Sn anodes for Li-ion battery: Dual-confinement via Sn@SnO₂ core-shell nanoparticles embedded in 3D graphitized porous carbon network. *Journal of Alloys and Compounds*, 857, 157920. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2020.157920>
- Gao, S., Wu, A. M., Jin, X. Z., Ye, F., Dong, X. L., Yu, J. Y., & Huang, H. (2017). Nanostructured Sn-M (M = Cu, Mg and Fe) intermetallic alloys and their

- electrochemical activity as anode electrodes in a Li-ion battery. *Journal of Alloys and Compounds*, 706, 401–408. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2017.02.191>
- Ghiji, M., Novozhilov, V., Moinuddin, K., Joseph, P., Burch, I., Suendermann, B., & Gamble, G. (2020). A Review of Lithium-Ion Battery Fire Suppression. *Energies* 2020, Vol. 13, Page 5117, 13(19), 5117. <https://doi.org/10.3390/EN13195117>
- Guler, M. O., Guzeler, M., Nalci, D., Singil, M., Alkan, E., Dogan, M., Guler, A., & Akbulut, H. (2018). Freestanding nano crystalline Tin@carbon anode electrodes for high capacity Li-ion batteries. *Applied Surface Science*, 446, 122–130. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2018.02.056>
- Hemavathi, S., Srirama, S., & Prakash, A. S. (2023). Present and future generation of secondary batteries: a review. *ChemBioEng Reviews*, 10(6), 1123–1145. <https://doi.org/10.1002/cben.202200040>
- Jia, R., Yue, J., Xia, Q., Xu, J., Zhu, X., Sun, S., Zhai, T., & Xia, H. (2018). Carbon shelled porous SnO₂-δnanosheet arrays as advanced anodes for lithium-ion batteries. *Energy Storage Materials*, 13(January), 303–311. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2018.02.009>
- Kamboj, N., Debnath, B., Bhardwaj, S., Paul, T., Kumar, N., Ogale, S., Roy, K., & Dey, R. S. (2022). Ultrafine Mix-Phase SnO-SnO₂ Nanoparticles Anchored on Reduced Graphene Oxide Boost Reversible Li-Ion Storage Capacity beyond Theoretical Limit. *ACS Nano*, 16(9), 15358–15368. <https://doi.org/10.1021/ACSNANO.2C07008>
- Kebede, M. A. (2020). Tin oxide-based anodes for both lithium-ion and sodium-ion batteries. *Current Opinion in Electrochemistry*, 21, 182–187. <https://doi.org/10.1016/J.COEELEC.2020.02.003>
- Kong, Z., Zhang, K., Huang, M., Tu, H., Yao, X., Shao, Y., Wu, Y., & Hao, X. (2022). Stabilizing Sn anodes nanostructure: Structure optimization and interfacial engineering to boost lithium storage. *Electrochimica Acta*, 405, 139789. <https://doi.org/10.1016/J.ELECTACTA.2021.139789>
- Kravchyk, K., Protesescu, L., Bodnarchuk, M. I., Krumeich, F., Yarema, M., Walter, M., Guntlin, C., & Kovalenko, M. V. (2013). Monodisperse and Inorganically Capped Sn and Sn/SnO₂ Nanocrystals for High-Performance Li-Ion Battery Anodes. *Journal of the American Chemical Society*, 135(11), 4199–4202. <https://doi.org/10.1021/JA312604R>
- Li, J., Long, J., Han, T., Lin, X., Sun, B., Zhu, S., Li, J., & Liu, J. (2022). A Hierarchical SnO₂@Ni₆MnO₈ Composite for High-Capacity Lithium-Ion Batteries. *Materials* 2022, Vol. 15, Page 8847, 15(24), 8847. <https://doi.org/10.3390/MA15248847>

- Li, Y., Lin, K., Qin, X., Zeng, K., Liu, Y., Xia, Y., Lv, F., Zhu, H., Kang, F., & Li, B. (2021). A nanoscale interlayer void design enabling high-performance SnO₂-carbon anodes. *Carbon*, 183, 486–494. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.06.089>
- Lin, Z., Lan, X., Xiong, X., & Hu, R. (2021). Recent development of Sn–Fe-based materials as a substitute for Sn–Co–C anodes in Li-ion batteries: a review. *Materials Chemistry Frontiers*, 5(3), 1185–1204. <https://doi.org/10.1039/D0QM00582G>
- Liu, Y., He, H., Jiang, J., Zhang, K., Liu, S., He, M., Han, G., Guo, X., Liu, W., & Li, B. (2019). Hollow carbonaceous microspheres-reduced graphene oxide enhances lithium storage performance of SnO₂-based anode. *Journal of Solid State Chemistry*, 270(December 2018), 553–562. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2018.12.032>
- Njema, G. G., Ouma, R. B. O., & Kibet, J. K. (2024). A Review on the Recent Advances in Battery Development and Energy Storage Technologies. *Journal of Renewable Energy*, 2024(1), 2329261. <https://doi.org/10.1155/2024/2329261>
- Roy, P., & Srivastava, S. K. (2015). Nanostructured anode materials for lithium ion batteries. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(6), 2454–2484. <https://doi.org/10.1039/C4TA04980B>
- Toçoğlu, U., Alaf, M., & Akbulut, H. (2020a). Towards high cycle stability yolk-shell structured silicon/rGO/MWCNT hybrid composites for Li-ion battery negative electrodes. *Materials Chemistry and Physics*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122160>
- Toçoğlu, U., Alaf, M., & Akbulut, H. (2020b). Towards high cycle stability yolk-shell structured silicon/rGO/MWCNT hybrid composites for Li-ion battery negative electrodes. *Materials Chemistry and Physics*, 240(July 2019). <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122160>
- Wang, X., Zhu, S., Dong, X., Huang, H., & Qi, M. (2021). Ionic liquid assisted electrospinning synthesis for ultra-uniform Sn@ mesoporous carbon nanofibers as a flexible self-standing anode for lithium ion batteries. *Journal of Alloys and Compounds*, 866, 158984. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2021.158984>
- Yi, Z., Wang, Z., Cheng, Y., & Wang, L. (2018). Sn-based Intermetallic Compounds for Li-ion Batteries: Structures, Lithiation Mechanism, and Electrochemical Performances. *Energy and Environmental Materials*, 1(3), 132–147. <https://doi.org/10.1002/EEM2.12016;WGROU:STRING:PUBLICATION>
- Zhang, B., Zheng, Q. Bin, Huang, Z. D., Oh, S. W., & Kim, J. K. (2011). SnO₂-graphene-carbon nanotube mixture for anode material with improved rate

capacities. Carbon, 49(13), 4524–4534.
<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.06.059>

Zhang, M., Wang, T., & Cao, G. (2015). Promises and challenges of tin-based compounds as anode materials for lithium-ion batteries. *International Materials Reviews*, 60(6), 330–352.
<https://doi.org/10.1179/1743280415Y.0000000004>;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER

Zoller, F., Böhm, D., Bein, T., & Fattakhova-Rohlfing, D. (2019). Tin Oxide Based Nanomaterials and Their Application as Anodes in Lithium-Ion Batteries and Beyond. *ChemSusChem*, 12(18), 4140–4159.
<https://doi.org/10.1002/CSSC.201901487>;WEBSITE:WEBSITE:CHEMISTRY-EUROPE;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:1864564X;ISSUE:ISSUE:DOI

BÖLÜM 8

Derin Öğrenme Teknikleri Kullanılarak Rektal Kanserde Bir Vaka Çalışması

Nihan Ozbaltan¹ & Cemre Doğan²

¹ Dr. Öğr. Üyesi, İzmir Bakırçay Üniversitesi, Orcid: 0000-0003-0191-312X

² İzmir Bakırçay Üniversitesi, Orcid: 0009-0007-5711-9642

1.Giriş

Kolorektal kanser, dünya çapında kansere bağlı mortalite ve morbiditeye sebep olan kanser türlerinden en yaygın olan üçüncü kanserdir (Heregger ve ark., 2023). Rektal kanser (RK) ise özel olarak kolorektal kanser vakalarının üçte birini oluşturmaktadır ve dünya genelinde yıllık kanser tanılarının ve ölümlerinin yaklaşık %10'undan sorumludur (X. F. Jiang ve ark., 2022). Rektal kanser, sağkalım oranları ve tedavi yaklaşımlarındaki farklılıklar nedeniyle genellikle kolorektal kanserden (KRK) farklı olarak kabul edilir (Oronsky ve ark., 2020). Son araştırmalara göre, RK insidansında 50 yaşın altındaki kişilerde bir artış gözlenmiştir ve ölüm oranında yıllık %1,3'lük bir artış olmuştur (Glynne-Jones ve ark., 2017; Oronsky ve ark., 2020). 2040 yılına kadar, yeni vakaların %63 artışla yılda 3,2 milyona ulaşması ve ölümlerin %73 artışla yılda 1,6 milyona yükselmesi beklenmektedir. Bu artış özellikle genç yetişkinlerde ve ekonomik geçiş sürecindeki ülkelerde beklenmektedir.

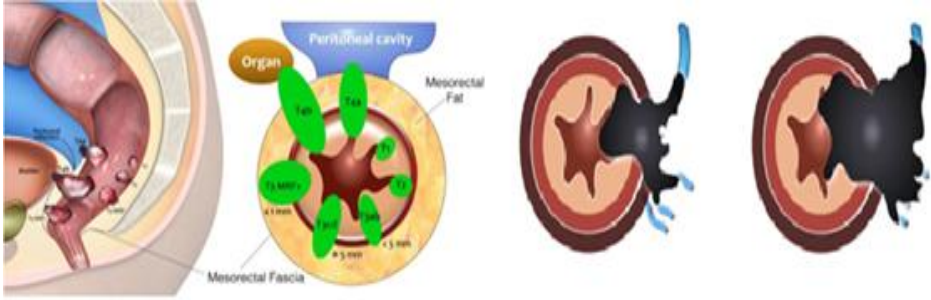
Doğru görüntüleme, RK'nin tanı ve tedavi planlamasında önemli bir rol oynar. Endoskopik Rektal Ultrason (ERUS), erken evre tümörler için tedavi planlamasına yardımcı olur. Bilgisayarlı tomografi (BT), metastazları tespit etmek için yararlıdır ancak sınırlı yumuşak doku çözünürlüğü nedeniyle lokal tümörleri değerlendirme yeteneği sınırlıdır. Hem Avrupa Tıbbi Onkoloji Derneği (ESMO) hem de Ulusal Kapsamlı Kanser Ağı (NCCN) kılavuzları, tedavi kararlarının yönlendirilmesinde kritik öneme sahip olan RC'nin değerlendirilmesi için manyetik rezonans görüntülemeyi (MRG) önermektedir. Yüksek çözünürlüklü MRG, kemoradyasyon ve radyoterapi öncesinde primer evreleme ve yeniden evreleme için gereklidir ve lenf düğümleri, ektramural vasküler invazyon (EMVI), müsin içeriği ve mezorektal fasiyal (MRF) tutulum gibi tümör özelliklerinin ayrıntılı olarak görüntülenmesini sağlar (Ma ve ark., 2019).

Rektal kanserin duvarlara ve komşu yağ dokusuna yayılma derecesi, hastalığın evresini belirlemede önemli bir faktördür. T evreleme sistemi kanserin lokal yayılımını sınıflandırmak için kullanılır. Bu sistem, kanserin lokal olarak ne kadar büyüdüğünü ve hangi çevre yapıları etkilediğini belirlemeye yardımcı olur. Rektal kanser için T evrelemesi Tablo 1'de gösterilmiştir (Santiago ve ark., 2020), (A. H. Zhao ve ark., 2021).

Tablo 1: Rektal kanserin evreleri (Glynn-Jones ve ark., 2017)

Sahne	Açıklama
T0	Kanser belirtisi yok.
Tis (Karsinoma in situ)	Kanser hücreleri rektumun iç astarıyla sınırlıdır.
T1	Kanser submukozaya yayılmış ama ötesine geçmemiş.
T2	Kanser muskularis propriyayı istila etmiş.
T3	Kanser mesane, rahim veya vajina dahil olmak üzere çevre dokulara yayılmıştır.
T4	Kanser mesane, rahim veya pelvik duvarlar gibi yakın organları istila etmiştir.

Bu evreleme sistemi, kanserin ne ölçüde yayıldığını ve tümörün boyutunu göstererek tedavi seçeneklerinin belirlenmesine yardımcı olur. MRI görüntüleri gibi segmentasyon için kullanılan görsel veriler, klinik uzmanlara tedavi planlaması ve hastalık ilerlemesinin anlaşılması için kritik bilgiler sağlar. Rektal kanserin duvara ve komşu yağ dokusuna yayılma derecesi, T evrelemesine göre şematik olarak Şekil 1’de gösterilmekte ve veri segmentasyonu için bir örnek teşkil etmektedir.



Şekil 1: Rektal Kanser T Evrelemesine Göre Yayılışı

Derin öğrenme ve yapay zekâ alanındaki gelişmeler, rektum kanseri teşhisi ve tedavi planlamasının hem doğruluğunu hem de verimliliğini artırma potansiyeli olduğunu göstermiştir (Haskins, 2020). Derin öğrenme modelleri, özellikle de konvolüsyonel sinir ağları (CNN'ler), MR görüntülerini yüksek hassasiyetle analiz ederek kanserli lezyonların tanımlanmasını ve karakterize edilmesini sağlayabilir. Bu modeller hem sınıflandırma hem de segmentasyon görevlerinde geleneksel yöntemlerden daha iyi performans göstererek hastalık hakkında

ayrıntılı ve güvenilir bilgiler sağlar. Rektal kanser MR görüntülerinin analizine derin öğrenme metotlarını entegre ederek, sağlık hizmeti sağlayıcıları için daha hızlı ve daha doğru teşhisler elde edebilir. Bu da daha az invaziv tedavilere, daha hızlı iyileşme sürelerine ve optimize edilmiş sağlık hizmeti kaynaklarına yol açar. Buna ek olarak, kanserli bölgelerin hassas bir şekilde haritalanması kişiselleştirilmiş tedavi stratejilerini destekleyerek hasta sonuçlarını iyileştirir.

Bu bölümde, rektal kanser MRG'lerinin sınıflandırılması ve segmentasyonuna odaklanan radyomiks, derin öğrenme yöntemleri ve uygulamaları ve vaka çalışması incelenecektir.

2. Veri Toplama ve Ön İşleme

Herkese açık görüntü veri kümeleri hazır olsa da araştırmacılar genellikle önceden eğitilmiş modellere ince ayar yapmak ve sonuçları doğrulamak için veri kümelerine insan açıklamaları eklemeyi tercih etmektedir. Tipik olarak, tıbbi uzmanlığa sahip öğrenciler organları tanımlarken, deneyimli radyologlar tümör lezyonlarına açıklama eklemeye odaklanırlar. Popüler açıklama platformları arasında 3D Slicer (Fedorov et al., 2012) bulunmaktadır. Standart açıklama süreci, aksel görünüm diliminin dilim dilim işaretlenmesini ve bu açıklamaların koronal ve sagittal görünümde düzeltilmesini içerir.

Yoğunluk eşikleme ve bölge büyütme gibi geleneksel makine öğrenimi (ML) teknikleri kullanılarak, yarı otomatik ek açıklama yöntemleri de kullanılmaktadır. Bölge büyütme, görüntüleri piksel yoğunluğu gibi benzer özelliklere sahip bölgelere ayırır. Eşikleme karaciğer dokusu, visceral yağ ve kas dokusu gibi yapıları segmentlere ayırmak için etkili olsa da iyi tanımlanmış sınırlar gerektirir. Keskin kenarlar olmadan segmentasyon tutarsız hale gelebilir ve ek ayarlamalar gerektirebilir. Segmentasyon aşımını eğitmeden önce ham verilerin önceden işlenmesi gerekir. Yaygın ön işleme adımları, tüm görüntü verilerinin tutarlı bir uzamsal çözünürlüğe (piksel aralığı) yeniden örneklenmesini içerir. Yukarı örnekleme doğruluğu garanti edemediğinden ve beklenmedik yapaylıklara yol açabileceğinden, genellikle görüntüler daha düşük bir çözünürlüğe aşağı örneklenir. Sinir ağları için eğitim verilerinin çeşitliliğini ve sağlamlığını artırmak amacıyla standart görüntü büyütme teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu büyütme yöntemleri şunları içerir:

Yapıyı korurken görüntü boyutunu ince bir şekilde değiştirebilen piksel aralığındaki küçük değişikliklere ölçeklendirme denir. Rotasyonlar, yönelimdeki küçük değişiklikleri hesaba katmak için x, y ve z eksenleri boyunca sınırlı bir aralıkta (örn. -5° ila 5°) uygulanır. Farklı aydınlatma koşullarını simüle etmek için yoğunluk seviyeleri değiştirilerek parlaklık ve kontrast ayarlamaları yapılır. Gama dönüşümleri, belirli yoğunluk alanlarını vurgulamak veya vurgusunu azaltmak için gama değerlerini ayarlamaktır. Gaussian Noise Adder, gerçek dünya görüntülerinde yaygın olarak bulunan gürültüyü simüle etmek için piksel değerlerine rastgele varyasyonlar ekler.

Buna ek olarak, veri setini daha da çeşitlendirmek için gelişmiş veri geliştirme stratejileri uygulanmaktadır. Bunlar şunları içerir: Rastgele Parlaklık Değişimleri, parlaklık seviyelerini %50 ile %150 arasında rastgele artırıp azaltarak farklı ışık yoğunluklarına sahip görüntüler oluşturur. Görüntü Çevirme ve Yansıtma, oryantasyon değişkenliğini artırmak için orijinal görüntünün çevrilmiş veya yansıtılmış versiyonlarını oluşturur. Rastgele Gürültü Giriş, farklı görüntü yakalama koşullarını simüle etmek için Gaussian, Poisson ve pretzel gürültüsü gibi gürültü türleri ekler. Rastgele Dönüşler, küçük rotasyonların ötesinde, bu ayarlamalar daha fazla açılabilir.

Büyütme işlemi, veri büyütmenin %70'lik bütünleşmiş bir olasılıkla uygulandığı olasılıksal bir yaklaşım kullanır. Her görüntü için 1-3 büyütme yöntemi, eğitim verilerine aşırı yüklenmeden dengeli bir değişkenlik sağlamak için rastgele seçilir. Bu yaklaşım, modelin farklı görüntüleme koşulları ve hasta senaryoları arasında genelleme yapma yeteneğini geliştirir.

3. Model Performansını Değerlendirme Metrikleri

Klinik karar desteğine uygunluk değerlendirmesi için, ikili sınıflandırma bağlamında yaygın kullanılan ölçütleri (AUC-ROC, doğruluk, duyarlılık, özgüllük, PPV, NPV) bu bölümde kısaca özetliyoruz. Aşağıdaki metrikler ikili sınıflandırma problemleri için, karışıklık matrisi (TP: gerçek pozitif, FP: yanlış pozitif, TN: gerçek negatif, FN: yanlış negatif) üzerinden tanımlanır.

Doğruluk (Accuracy): Tüm tahminlerin ne kadarının doğru olduğunu ölçer. Sınıflar dengesiz ise yanıltıcı olabilir; tek başına kullanılmamalıdır.

$$(TP+TN)/(TP+FP+TN+FN)$$

Denklem

1

Özgüllük (Specificity, TNR): Negatif vakaları doğru tanımlama olasılığı. Örn. rektal kanseri **olmayan** bireyleri doğru dışlama oranıdır. Tarama testlerinde yanlış pozitiflerin maliyeti yüksekse kritik önemdedir. $TN/(TN+FP)$

Denklem 2

Duyarlılık (Sensitivity, Recall, TPR): Gerçek pozitifleri yakalama olasılığı. Kaçırılan vakaların bedeli yüksekse (örn. kanser) duyarlılık önceliklidir.

$$TP/(TP+FN)$$

Denklem

3

AUC-ROC (Area Under the ROC Curve): Duyarlılık (TPR) ile 1-Özgüllük (FPR) arasındaki ROC eğrisinin altında kalan alan. 1.0'a yaklaştıkça ayırt etme gücü yüksektir; 0.5 civarı rastgele tahmin düzeyidir. Eşik bağımsızdır ve **sınıf dengesizliği** yüksek olduğunda PR-AUC ile raporlanması önerilir. $TPR = TP/(TP+FN)$

Denklem

4

$$\text{FPR} = \text{FP}/(\text{FP}+\text{TN})$$

Denklem 5

$$\text{AUC} = \int \text{ROC egrisi altında kalan alan}$$

Denklem 6

F1 Skoru: Precision ve Recall'un harmonik ortalaması. Dengesiz veri setlerinde faydalıdır hem kaçırmaları hem de yanlış alarmları dengeler.

$$F1 = 2 \cdot (\text{Precision} \cdot \text{Recall}) / (\text{Precision} + \text{Recall})$$

Denklem 7

Dice Katsayısı (Dice Similarity Coefficient, DSC): Segmentasyonun doğruluğunu ölçmek için yaygın olarak kullanılan bir metriktir. Dice Loss, segmentasyon maskesindeki tahmini ve gerçek piksel değerlerinin örtüşme derecesini optimize eder. 0 ile 1 arasında bir değer alır, burada 1, tahminin ve gerçek maskenin tamamen örtüştüğünü gösterir. Dice katsayısı, özellikle dengesiz veri setlerinde (örneğin, küçük tümörler gibi) segmentasyon doğruluğunu ölçmek için idealdir. Burada A, tahmin edilen segment, B ise gerçek segmenttir.

$$DSC = \frac{2 \times |A \cap B|}{|A| + |B|}$$

Denklem 8

IoU (Intersection over Union): IoU, modelin tahmin ettiği segmentasyon maskesi ile gerçek segmentasyon maskesi arasındaki örtüşme oranını ölçer. Daha hassas bir ölçüm sağlar ve Dice katsayısına benzer bir şekilde 0 ile 1 arasında bir değer alır. IoU, özellikle segmentlerin tam sınırlarının belirlenmesi gereken durumlarda kritik bir metriktir.

$$IoU = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|}$$

Denklem 9

Sonuç olarak, klinik karar desteğinde güvenilirlik için eşik seçimi ve sınıf dengesizliği göz önünde bulundurularak bu metriklerin birlikte raporlanması gerekir.

4. Radyomik ve Derin Öğrenme

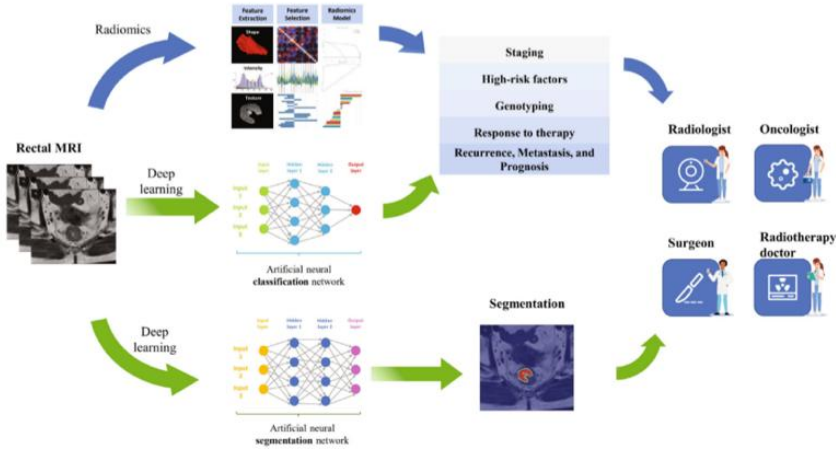
MR görüntüleme (MRI) artık rektum kanserli hastaların standart incelemesinin bir parçasıdır. (Haak ve ark., 2020). Esas olarak dokuların yapısına bakan standart MRG, rektal kanserin tedavisini yönlendirmek için yeterli ayrıntı sağlamada genellikle yetersiz kalmaktadır. Bu durum, aşağıdaki gibi gelişmiş MRG tekniklerine ilgi duyulmasına yol açmıştır: Difüzyon Ağırlıklı Görüntüleme (DWI), suyun dokularda nasıl hareket ettiğini ölçerek anormal alanların belirlenmesine yardımcı olabilir. Intravoxel Incoherent Motion (IVIM), dokulardaki küçük damarlarda hem su hareketine hem de kan akışına bakar.

Difüzyon Kurtosis Görüntüleme (DKI), su hareketindeki düzensizlikleri yakalayarak doku yapısı hakkında daha ayrıntılı bilgiler verir. T2 Ağırlıklı Görüntüleme (T2WI), su içeriğindeki farklılıkları vurgulayarak yumuşak dokuların ayrıntılı görüntülerini sağlar.

Bu yöntemler doku yapısı ve işlevindeki değişiklikleri tespit edebilirken, genellikle tutarlılıkla mücadele ederler. Gürültüden (görüntülerdeki istenmeyen parazit) ve farklı durumlara iyi uyum sağlamayan katı modellerden etkilenebilirler. Bu zorluklar nedeniyle, rektum kanseri için tanı ve tedavi planlamasını iyileştirmek amacıyla bu görüntüleri analiz etmek için güvenilir araçlar oluşturmak hala zor bir görevdir

Radyologlar, tıbbi görüntüleri görsel olarak incelemek ve çeşitli hastalıkları tespit etmek, tanımlamak ve izlemek için bulguları rapor etmek üzere eğitilirler. Bu değerlendirmeler tipik olarak eğitim, öğretim ve deneyime dayanır. Zaman içinde radyologlar, tıbbi içgörü ve muhakeme kullanarak karmaşık bulgu kümelerini teşhis etme becerisini geliştirirler, ancak insan merkezli her görevde olduğu gibi, bu değerlendirmeler de öznelliğe tabi olabilir. Gelişmekte olan yapay zekâ radyoloji uygulamaları, öncelikle belirli teşhis görevlerine odaklanırken, alternatif bir yaklaşım sunmaktadır. İnsan merkezli nitel akıl yürütmenin aksine, YZ'nın gücü, tekrarlayan ve basit görevlerin üstesinden gelme veya zaman içinde görüntüleme özelliklerinin otomatik kantitatif çıkarımını sağlama yeteneğinde yatmaktadır. YZ, klinisyenlere yardımcı olacak bir araç olarak klinik süreçte entegre edildiğinde, daha doğru ve tekrarlanabilir radyolojik değerlendirmeler yapılabilir.

YZ, görüntü verilerindeki karmaşık desenleri otomatik olarak tanıyabilir ve radyografik özelliklere dayalı nicel değerlendirmeler sağlayabilir. RC'de YZ uygulamaları, tanısal doğruluğu, prognozu ve tahmini iyileştirmek için birinci ve daha yüksek dereceli görüntü özelliklerini çıkaran ve analiz eden radyomikleri içerir. Bununla birlikte, radyomiks iyi açıklanmış özellikler sağlar ve küçük veri kümelerinde iyi performans gösterirken, daha büyük veri kümelerindeki performansı, konvolüsyonel sinir ağları (CNN'ler) gibi sinir ağları tarafından gölgede bırakılabilir. CNN'ler, ayırıcı tanı, tümör segmentasyonu, lezyon tespiti ve hızlandırılmış görüntüleme gibi görevler için kritik olan tıbbi görüntülerdeki karmaşık özellikleri tespit etmede mükemmeldir (Lian ve ark., 2023).



Şekil 2: Rektal kanserde MRG'ye dayalı yapay zeka uygulaması (Wong ve ark., 2023)

Özetle, YZ evrelemeyi, yüksek risk faktörlerinin tahminini, genotiplemeyi, tedaviye yanıtın değerlendirilmesini, nüks ve metastaz tahminini, prognozu ve MRG tabanlı segmentasyonu iyileştirerek RC yönetimini önemli ölçüde etkilemiştir (H. T. Zhu ve ark., 2021a). Şekil 2’de rektum kanserinde YZ uygulamaları özet olarak gösterilmiştir. Radyomik ve derin öğrenme yöntemleriyle rektal kanser MR görüntülerinin sınıflandırma ve segmentasyonu bu bölümün geri kalanında anlatılacaktır.

4.1. Radyomiks

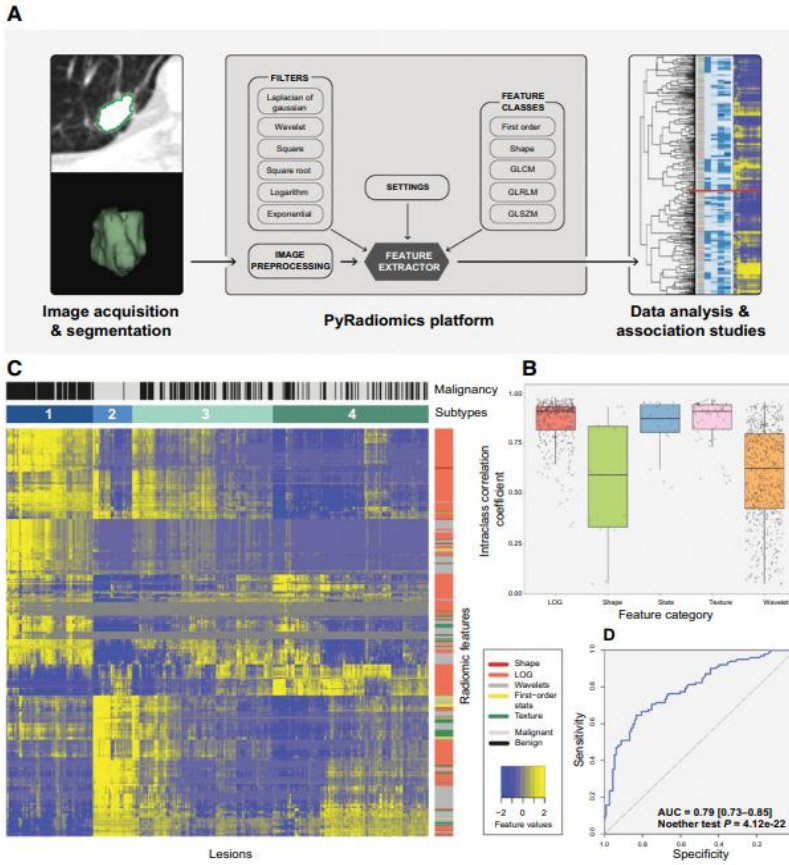
Radyomiks (Radiomics), tıbbi görüntülerden (örneğin MR, BT, PET) yüksek boyutlu niceliksel özellikler çıkararak, hastalıkların tanı, prognoz ve tedavi yanıtlarını değerlendirmek için kullanılan bir yöntemdir. Tablo 2’de verilen bu özellikler tümörün şekil, doku yapısı, heterojenite ve mikroyapısal değişiklikleri gibi klinik olarak anlamlı veriler içerir. Önceden tanımlanmış kural tabanlı algoritmalara veya derin öğrenme tekniklerine dayanan radyomik tabanlı yapay zeka (AI) teknolojisi, noninvaziv görüntüleme tabanlı biyobelirteçlerin geliştirilmesini kolaylaştırabilir (Van Griethuysen et al., 2017). Bu teknik, insan gözünün algılayamayacağı detayları belirleyerek rektal kanser teşhisinde, evrelemesinde ve hasta yönetiminde önemli bir rol oynar (Gillies ve ark., 2016), (Lambin ve ark., 2017), (Mayerhoefer ve ark., 2020). Radyomik doku özellikleri, bir lezyon içindeki gri seviyelerin dağılımını ve ilişkilerini analiz ederek tümör heterojenliği ve mikro çevre hakkında gizli ayrıntıları ortaya çıkarır ve tümör fenotipinin kapsamlı bir karakterizasyonunu sağlar (Capobianco ve Dominiotto, 2020), (Rogers ve ark., 2020). Tümör heterojenliği, tedaviye yanıtı ve prognozu etkileyebileceği için çok önemlidir; heterojen tümörler genellikle daha agresif davranışlar ve tedavilere karşı daha fazla direnç gösterir (Dagogo-Jack & Shaw, 2018).

Tablo 2: Radyomik özellikler kategorisi

Özellik Kategorisi	Açıklama
Birinci dereceden özellikler (Zwanenburg ve ark., 2016)	Yaygın olarak kullanılan ve basit ölçütleri uygulayan birinci dereceden istatistikler, maske tarafından belirlenen hedef bölge içindeki voksel yoğunluklarının dağılımını ölçer; örneğin, maksimum, minimum, ortalama, medyan, yüzde 10 ve yüzde 90 yoğunluk değerleri.
Şekil tabanlı özellikler (Zwanenburg ve ark., 2016)	Bu özellik kategorisi, ROI içindeki gri seviye yoğunluk dağılımına bağlı olmayan, ilgilenilen bölgenin (ROI) 2D ve 3D boyutunu ve şeklini tanımlayan açıklamaları içerir. Şekil özellikleri tümör hacmi, yüzeyler, küresellik, kompaktlık vb. ile ilgili metrikleri içerir
Gri seviye özellikleri	Gri seviye eş-oluşum matrisi (GLCM) özellikleri (Haralick ve ark., 1973): Maske tarafından sınırlanan bir görüntü bölgesinin ikinci dereceden ortak olasılık fonksiyonu bir GLCM tarafından tanımlanır.
	Gri seviye boyut bölgesi matrisi (GLSZM) özellikleri (Haralick ve ark., 1973): Görüntülerin gri seviyeleri bir GLSZM ile ölçülebilir. Tüm görüntüler için tek bir GLSZM matrisi hesaplanır.
	ROI'deki yönler, onu rotasyondan bağımsız hale getirir
	Gri seviye bağımlılık matrisi (GLDM) özellikleri (Sun & Wee, 1983): GLDM, bir görüntünün gri seviyeleri ile korelasyonu test eder.

El yapımı radyomik özellikler, tıbbi görüntülerde gözlemlenen çeşitli tümör özelliklerini temsil etmek için tasarlanmıştır. Bu özellikler belirli bir ilgi alanına göre tanımlanır ve altta yatan görüntü özelliklerine göre çıkarılır. Özellikler çıkarıldıktan sonra, bu görüntü tabanlı biyobelirteçleri kullanarak sonuçları tahmin etmek için istatistiksel, makine öğrenimi (ML) veya derin öğrenme (DL) modelleri kullanılabilir.

Radyomik (Radiomic) iş akışının genel yapısı ve elde edilen temel biyobelirteç bulguları Şekil 3'te özetlenmektedir. Bu görsel, görüntü işleme süreçlerinden başlayarak, farklı lezyon tiplerinde malignite (kötü huyluluk) tahmini için radyomik özelliklerin performansını adım adım göstermektedir.



Şekil 3: Radyomik Özellik Çıkarımı ve Malignite Tahmini Süreci A) PyRadiomics sürecine genel bakış. B) Uzman radyologlar tarafından manuel segmentasyonlardaki varyasyon için radyomik özelliklerin kararlılığı. C) Lezyonun (sütunlar) radyomik özelliklerinin (satırlar) ifade değerlerini gösteren ısı haritası. D) Çok değişkenli biyobelirteçlerin nodüllerin malignitesini tahmin etme performansını gösteren eğri altındaki alan (AUC) (Van Griethuysen et al., 2017).

Şekil 3A'da, PyRadiomics platformunu kullanan genel radyomik iş akışı şematik olarak sunulmuştur. Bu süreç; görüntü edinimi ve segmentasyon, ön işleme, çeşitli filtre ve ayarlar kullanılarak özellik çıkarımı (feature extraction) ve son olarak veri analizi ve ilişkilendirme çalışmalarını içermektedir. Elde edilen radyomik özelliklerin tutarlılığını inceleyen Şekil 3B, uzman radyologlar tarafından yapılan manuel segmentasyonlardaki değişkenlikten kaynaklanan radyomik özelliklerin varyasyonunu göstermektedir. Bu panel, özellikle farklı radyomik özellik kategorilerinin (Shape, Histogram, vs.) korelasyon katsayılarını sunarak, hangi özelliklerin segmentasyon değişimine daha duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 3C ise lezyonların (sütunlar) radyomik özelliklerinin (satırlar) ifade değerlerini gösteren ve malignite durumuna göre kümelenmiş ısı

haritasıdır (Heatmap). Bu harita, özellikle belli radyomik özellik gruplarının malign ve benign (iyi huylu) lezyonlarda farklı ekspresyon paternleri sergilediğini görselleştirmektedir. Son olarak, Şekil 3D'de çok değişkenli biyobelirteç modellerinin maligniteleri tahmin etme performansını gösteren Alıcı İşletim Karakteristiği (ROC) eğrisi sunulmuştur. Eğrinin altındaki alan (AUC) değeri 0.75'in üzerinde bir tahmin gücüne işaret ederek, radyomik özelliklerin tanısal potansiyelini desteklemektedir. Bu bulgular ışığında, PyRadiomics ile çıkarılan özelliklerin lezyonların malignite durumunu tahmin etmede güvenilir bir potansiyele sahip olduğu görülmektedir.

Radyomik özellik çıkarımı, T2WI ve ADC görüntülerinden 3B özellikler elde etmek için Python ve PyRadiomics paketi kullanılır (Van Griethuysen ve ark., 2017). Python'da uygulanan PyRadiomics, bağımsız olarak kullanılabilir veya 3D Slicer ile entegre edilebilir. Kaynak kodu, belgeler ve örnekler www.radiomics.io adresinde herkese açık olarak mevcuttur. Bu platform, radyomik analiz için bir referans standardı oluşturmayı, bakımı yapılmış ve onaylanmış bir kaynak sağlamayı ve kanser araştırmalarındaki kritik ihtiyaçları karşılamak için büyüyen bir radyomik geliştiriciler topluluğunu teşvik etmeyi amaçlamaktadır.

Uygulamada, radyomik özellikleri hesapladıktan sonra, yaygın bir ilk adım, üretilen birçok özelliği algoritmik olarak filtreleyerek çalışmanın amacıyla en alakalı birkaç taneye indirmektir. En uygun özelliklerin seçilmesi tahmin performansını artırabilir veya esnekliği ve kararlılığı geliştirebilir. Son olarak, seçilen bu özellikler kullanılarak klinik sonuçları tahmin etmek için bir istatistiksel ML modeli veya bir DL modeli kullanılır. Özellik boyutlarını azaltmak ve tahminler yapmak için en küçük mutlak küçültme ve seçim operatörü (LASSO) yöntemi kullanılır (Tibshirani, 1996). Veri kümesi çok sayıda bağımsız değişken veya çok sayıda gözlem içerdiğinde, araştırmacılar bir sonucu tahmin etmeyi ve ilgili değişkenlerin cimri bir alt kümesini belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu yaklaşım, önceden var olan teorilere dayanmak yerine, en öngörücü değişkenleri seçmek ve modeli oluşturmak için istatistiksel yöntemler kullanarak hipotez üretmektedir.

Özellik seçiminde kullanılan yöntemlerden biri olan Başlıca Bileşen Analizi (PCA-Principal Component Analysis), yüksek boyutlu verilerde gereksiz ve yinelenen özellikleri eleyerek en önemli değişkenleri belirlemeyi amaçlayan bir boyut azaltma yöntemidir. Bu teknik, modelin öğrenme sürecinde gereksiz bilgilerin ortadan kaldırılmasını sağlayarak hem hesaplama maliyetini düşürmekte hem de modelin genelleme yeteneğini artırmaktadır (Hotelling, 1933). Boyut indirgemenin anahtarı, mümkün olduğunca çok ilgili bilgiyi korurken bir veri kümesindeki özelliklerin veya değişkenlerin sayısını etkili bir şekilde azaltmaktır. Bu işlem, veri kümesini basitleştirerek özellikle yüksek boyutlu uzaylarda analiz edilmesini ve yorumlanmasını kolaylaştırır.

Görüntü işleme sürecinde z-skoru normalizasyonu ve voksel boyutunun yeniden örneklenmesi, modelin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmak için kritik adımlardır. Z-skoru normalizasyonu, her bir görüntü özelliğini standart hale getirerek, farklı hastalar ve tarama cihazları arasındaki yoğunluk farklılıklarını ortadan kaldırmayı amaçlar. Bu işlem, her özelliğin ortalamasının çıkarılması ve standart sapmaya bölünmesiyle gerçekleştirilir, böylece veriler 0 ortalamalı ve 1 standart sapmalı hale getirilir. Bu, özellikle radyomik özelliklerin tutarlı şekilde çıkarılmasını ve makine öğrenmesi algoritmalarının daha dengeli çalışmasını sağlar. Ayrıca, tüm görüntülerin $1 \times 1 \times 1$ mm voksel boyutuna yeniden örneklenmesi, farklı cihazlardan elde edilen veriler arasındaki çözünürlük farklarını gidermeye yardımcı olur. MR veya BT taramalarında farklı cihazlar ve ayarlar nedeniyle voksel boyutu değişebilir. Bu farklılıklar, doğrudan radyomik özelliklerin tutarsızlığına yol açabilir. Yeniden örnekleme, tüm görüntülerin aynı uzamsal çözünürlüğe getirilmesini sağlayarak, modelin tümörleri doğru bir şekilde karşılaştırmasını ve analiz etmesini kolaylaştırır.

Çok sayıda boyutu içeren karmaşık yapıları nedeniyle radyomik özellikler, onkolojide yararlı radyomik imzalar geliştirmek için çeşitli makine öğrenimi ve derin öğrenme algoritmalarına entegre edilmiştir (Papanikolaou ve ark., 2020), (Koenigkam Santos ve ark., 2019), (L. Wei ve ark., 2019). Rektum kanseri de dahil olmak üzere farklı kanser türlerinde lezyonları karakterize etmek, tedavi kararlarını yönlendirmek ve tümör prognozunu tahmin etmek için biyobelirteç olarak radyomik özelliklerin etkinliği vurgulanmıştır (Horvat ve ark., 2019), (Bi ve ark., 2019), (Z. Liu ve ark., 2019), (Schick ve ark., 2019), (Nougaret ve ark., 2019).

Yin ve arkadaşları, özellikle lokal invazyon (T evresi) ve nodal tutulumu (N evresi) odaklanarak rektum kanserinin farklı evrelerini tahmin etmede difüzyon ağırlıklı görüntüleme (DWI) ve görünür difüzyon katsayısı (ADC) haritalarına dayalı doku analizini araştırmıştır (Yin ve ark., 2020). Araştırmacılar, ADC ölçümleri (ortalama, minimum ve maksimum), doku özellikleri, dalgacık parametreleri gibi çeşitli görüntüleme özellikleri çıkarmıştır. Bu yaklaşım, en uygun tedavi stratejisinin belirlenmesi için doğru evreleme çok önemli olduğundan, tedavi planlaması için değerli bilgiler sağlayabilir.

Çeşitli çalışmalar, MRG radyomiklerinin klinik açıdan anlamlı çok sayıda görevi yüksek doğrulukla gerçekleştirebildiğini göstermektedir: T2WI tabanlı şiddetli inflamatuvar yanıtın öngörülmesi (L. Chen ve ark., 2024); EMVI'nin saptanması (Liang ve ark., 2024; Shin ve ark., 2022); T2 ve DWI'ye dayalı patolojik tam yanıt tahmini ile T1W/T2W görüntülerden tedavi yanıtının öngörülmesi (Wang ve ark., 2024); ayrıca mezorektal yağın radyomik özellikleri kullanılarak T2–T3 evre rektal kanserin preoperatif tanısına yönelik nomogramın geliştirilip doğrulanması (Zhuang ve ark., 2024; B. Deng ve ark., 2024).

Bilgisayarların kendi karar verme algoritmalarını oluşturmaya öğrendikleri makine öğrenimi, yakın zamanda CRC'nin teşhis ve tahmininde kullanılmıştır (Hornbrook ve ark. 2017), (Nakajima ve ark., 2018). Bu yöntemin gücü, milyonlarca veriden ve karmaşık ilişkilerden otomatik olarak sınıflandırma yapma ve birincil özellikleri belirleme yeteneğinde yatmaktadır. Özellik indirgemesinden sonra, farklılaşma derecesini, T aşamasını ve N aşamasını tahmin etmek için makine öğrenimi algoritmaları uygulanır. Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP), Lojistik Regresyon (LR), Destek Vektör Makinesi (SVM), Karar Ağacı (DT), Rastgele Orman (RF) ve K-En Yakın Komşu (KNN) (Long ve ark. 2019), (H. Li ve ark., 2021), (Ma et al., n.d.).

Çok katmanlı algılayıcı (MLP), klinik parametrelerden özellik çıkarımı için kullanılır (Xu ve ark., 2024). Her biri doğrusal bir katman, bir aktivasyon fonksiyonu ve bir normalizasyon katmanı içeren iki tam bağlı blok setinden oluşur. MLP, ağırlık manipülasyonu ve boyutsallık genişletmesi kullanarak görüntü özellikleriyle uyumlu klinik özellikler üretir.

Geleneksel lojistik regresyon teknikleri, araştırmacıların riski tahmin edebilen tanımlayıcı bir model kullanarak birden fazla risk faktörünün belirli bir sonuçla ilişkisini değerlendirmelerini sağlar (Leonard ve ark., 2022). Model tarafından üretilen katsayılar, klinisyenlere risk faktörleri ile sonuç arasındaki ilişkilerin gücüne dair bir gösterge sağlar. Ancak lojistik regresyon, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenin log oranlarıyla doğrusal olarak ilişkili olmasını gerektirir. 'Evet' ve 'hayır' gibi ikili sonuçları tahmin etmek için kullanılır ve kolon ve rektum cerrahisi için sonuçları tahmin etmede uygulanmıştır. Kullanışlı olmasına rağmen lojistik regresyonun kendine özgü dezavantajları vardır. Değişkenler arasındaki yüksek korelasyonun sonuçları bozabileceği çoklu doğrusallığa karşı hassastır. Çok değişkenli modellerde kullanılan değişken seçim yöntemleri sonuçların anlamlılığını aşırı şişirebilir. Ayrıca lojistik regresyon, aşırı uyuma karşı koruma sağlayan doğal mekanizmalardan yoksundur. Gelişmiş yöntemler doğrusallık gerekliliklerini gevşetebilir ve etkileşimlere izin verebilir, ancak bu etkileşimlerin önceden tanımlanması gerekir. Zhu ve arkadaşları, (H. Zhu ve ark., 2019) lojistik regresyon kullanarak T2WI'ye dayalı neoadjuvan kemoradyoterapi sonrası lokal ileri rektal kanserin patolojik nodal evresini tahmin lenf nodu (LN) özellikleri ile tümör özelliklerinin etkinliğini karşılaştırmıştır. Liu ve arkadaşları, rektum kanseri (RC) hastalarında, hastalarda en yaygın ölüm nedeni olan senkron karaciğer metastazını (SLM) tahmin etmek için radyomik ve klinik faktörlerin kullanımını araştırmıştır (M. Liu ve ark., 2020). Radyomik özellikleri elde etmek için Lasso yöntemi uygulanmış, ardından çok faktörlü analiz için Lojistik regresyon kullanılmıştır. Zhu ve arkadaşları, lokal ileri rektum kanseri (LARC) hastalarında neoadjuvan kemoradyoterapiye yanıtı tahmin etmek için çok parametrelili MRG radyomiklerinin kullanımını araştırmıştır (W. Zhu ve ark., 2024). Özellikler tümör hacminden ve mezorektal yağdan çıkarılmıştır. Sınıflandırma için lojistik regresyon kullanılmıştır. Cai ve arkadaşları, rektum

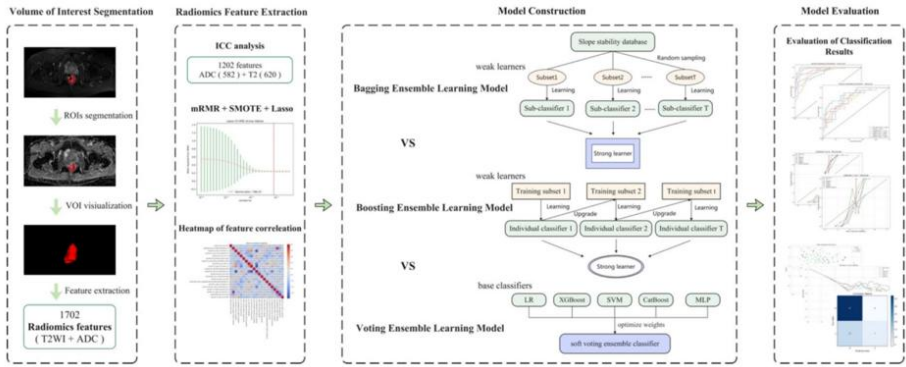
kanseri (RC) hastalarında mikrosatellit instabilite (MSI) durumunu tahmin etmek için multiparametrik MRG'ye dayalı bir alt bölge radyomik modelinin kullanımını araştırmıştır (Z. Cai ve ark., 2024). Özellik seçimini kullanmak için lojistik regresyon uygulanmıştır. Meng ve arkadaşları, T3 rektum kanserinde lenf nodu metastazının (LNM) ameliyat öncesi tahminini iyileştirmek için MRG tabanlı çok sekanslı, çok bölgeli bir radyomik model geliştirmiştir (Meng ve ark., 2024). Tümör ve peritümöral mezorektumdan klinik faktörler, subjektif görüntüleme özellikleri ve radyomik özellikler, T2 ağırlıklı görüntüleme (T2WI) ve görünür difüzyon katsayısı (ADC) görüntülerinden çıkarılmıştır. Özellik seçimi ve boyut azaltma için Spearman'ın sıra korelasyon katsayısı, Mann-Whitney U testi ve en küçük mutlak küçültme ve seçme operatörü (LASSO) kullanılmıştır. Altı lojistik regresyon modeli geliştirilmiştir.

Destek vektör makinesi (DVM) sınıflandırıcısı, yalnızca nokta çarpımları yoluyla elde edilen verilere dayandıran bir çekirdek algoritmasıdır. DVM sınıflandırıcısı, kolorektal kanserin metastazının tahmin edilmesi için yaygın olarak uygulanmaktadır (Zhi ve ark., 2018). Metastatik ve metastatik olmayan KRK örneklerini sınıflandırmak için DVM kullanmışlardır. Jayaprakasam ve arkadaşları, (Jayaprakasam ve ark., 2022) lokal olarak ilerlemiş rektum kanseri (LARC) olan hastalarda klinik sonuçları tahmin etmek için mezorektal yağdan elde edilen MRG radyomik özelliklerinin kullanımını araştırmıştır. Üç radyolog bağımsız olarak mezorektal yağı segmentlere ayırmış ve radyomik özellikler CERR yazılımı (Deasy ve ark., 2003) kullanılarak çıkarılmıştır. Model seçimi için beş kat çapraz doğrulamalı destek vektör makineleri kullanılmıştır. Hu ve arkadaşları (Hu ve ark., 2024) lokal ileri rektum kanserli (LARC) hastalarda neoadjuvan kemoradyoterapiye (nCRT) iyi yanıtı (GR) ve klinik sonuçları tahmin etmek için T2 ağırlıklı (T2W) MRG ve Görünür Difüzyon Katsayısı (ADC) haritalarına dayalı olarak MRG tabanlı radyomiklerin kullanımını değerlendirmiştir. Özellik seçimi için Destek Vektör Makinesi (DVM) kullanılmıştır.

Rastgele orman sınıflandırıcıları, torbalama adı verilen bir teknik kullanarak sınıflandırma ağaçları oluşturmak için rastgele veri toplar. Ayrıca bir tahmin edici değişken de rastgele seçilir ve ağacın yapısı belirlenirken en iyi sınıflandırıcı olarak seçilir (Anuraga ve ark., 2019). Rastgele orman sınıflandırması, birden fazla ağacın örnek veriler üzerinde eğitilerek birleştirilmesidir. Seçim süreci için karar ağaçlarını kullanır; burada her ağaç, öznitelik türüne bağlı olarak verilerin bölümlendirilmesiyle aynı sınıftaki veriler temelinde özyinelemeli olarak bölümlendirilir. Rektum kanseri ameliyatından sonra yaygın ve ciddi bir komplikasyon olan anastomoz kaçağının oluşumunu tahmin etmek için bu yöntem kullanılmıştır (Wen ve ark., 2021). Lin ve arkadaşları (Lin ve ark., 2018), başlangıçtaki 18F-florodeoksiglukoz ([18F] FDG)-pozitron emisyon tomografisi (PET)/bilgisayarlı tomografiden (BT) elde edilen radyomiklere dayalı olarak patolojik tam yanıtı (pCR) tahmin etmek için bir rastgele orman (RF) modeli

geliştirmiştir (Shen ve ark., 2020). Liu ve arkadaşları, rektum kanseri hastalarında preoperatif senkron uzak metastazı (SDM) tahmin etmek için T2 ağırlıklı (T2W) görüntülere dayalı MR radyomiklerinin kullanımını araştırmıştır (H. Liu ve ark., 2019). Özellik seçimi için rastgele orman algoritması uygulanmıştır.

Ensemble Learning, bu yüksek boyutlu veriyi en iyi şekilde değerlendirmek için güçlü bir yöntemdir. Radyomiks (Radiomics) ve Ensemble Learning (Topluluk Öğrenmesi) birleştirilerek, tıbbi görüntülerden çıkarılan karmaşık özelliklerin daha güçlü modellerle işlenmesini sağlayabilir. Şekil 4'te radyomik bir model örneği gösterilmiştir. Ensemble Learning, birden fazla makine öğrenmesi modelini birleştirilerek daha yüksek doğruluk ve genel performans elde etmeyi amaçlayan bir yöntemdir. Tek bir modelin yapabileceğinden daha iyi tahminler yapmak için farklı modellerin tahminlerini birleştirir. Bu teknik, özellikle genelleme hatasını azaltarak aşırı öğrenmeyi (overfitting) önler ve modelin sağlamlığını artırır.



Şekil 4 : Radyomik model örneği (J. Wang et al., n.d.)

Bagging-ensemble öğrenme modeli, bootstrap örnekleme yöntemiyle birden fazla alt veri kümesi oluşturarak temel modellerin eğitilmesini sağlar. Bu yaklaşım, model varyansını azaltarak genelleme yeteneğini artırır ve tahmin doğruluğunu iyileştirir. İlk aşamada, orijinal veri kümesinden m eğitim örneği rastgele seçilir ve bu işlem T kez tekrarlandığında, T farklı eğitim seti oluşturulur. Her bir eğitim seti, bireysel zayıf öğrenicileri eğitmek için kullanılır ve nihai tahmin, bu öğrenicilerin sonuçlarının ortalaması alınarak veya oylama yöntemiyle birleştirilerek elde edilir.

Boosting-ensemble öğrenme modeli, olağanüstü tahmin yetenekleriyle yaygın olarak tanınmaktadır. Boosting, her öğrenme adımının bir öncekinin üzerine inşa edildiği ve modelin doğruluğunu aşamalı olarak iyileştiren bir iteratif topluluk tekniğidir. Bu ileriye doğru dağıtılmış yaklaşım yanlış sınıflandırılmış örneklerin ağırlıklarını ayarlayarak genel tahmin performansını artırmak için önemlerini artırır. İlk zayıf öğrenicinin başlangıçta orijinal veri kümesi üzerinde eğitilir,

tahmin sonuçlarına göre, eğitim örneklerinin dağılımı değiştirilerek eğitim grubu 2 oluşturulur ve bu grup daha sonra ikinci zayıf öğreniciyi eğitmek için kullanılır. Bu iteratif süreç, önceden tanımlanmış bir sonlandırma kriteri karşılanana kadar devam eder. Nihai tahmin, tüm temel öğrencilerden elde edilen çıktıların ağırlıklı toplamı hesaplanarak belirlenir. Bu tekniğe örnek olarak Extreme Gradient Boosting (XGBoost), Light Gradient Boosting Machine (LightGBM), Adaptive Boosting (AdaBoost) ve Categorical Boosting (CatBoost) gibi birçok köklü boosting algoritması gösterilebilir.

Hiperparametre optimizasyonu veya ayarlama, bir çapraz doğrulama seti üzerinde performansı en üst düzeye çıkarmak için en iyi hiperparametre değerleri kümesini belirleyerek makine öğrenimi algoritmalarının tahmin doğruluğunu artırmak için gereklidir. Izgara arama, rastgele arama, Bayesian arama, gradyan tabanlı arama ve çoklu sadakat arama yöntemleri dahil olmak üzere çeşitli otomatik hiperparametre optimizasyon yöntemleri mevcuttur.

Oylama Topluluğu Öğrenme Modeli (VELM), doğruluk ve genelleme yeteneklerini geliştirmek için birden fazla modelden gelen tahminleri entegre eden bir makine öğrenimi topluluğu yöntemidir. VELM, zayıf sınıflandırıcıların performansını artırarak hem tahmin gücü hem de sağlamlık açısından bireysel modellere göre üstünlük göstermiştir. Tek bir tahmin ediciye güvenmek yerine, bu yaklaşım birden fazla zayıf öğrenciden gelen tahminleri bir araya getirerek model kararlılığını ve genelleştirilebilirliğini artırır. VELM hem sert oylama hem de yumuşak oylama stratejilerini kullanır. Farklı algoritmalarından gelen tahminleri ağırlıklı bir şekilde birleştirerek öğrenme kapasitesini artırır, bireysel zayıflıkları telafi eder ve daha doğru ve güvenilir tahminlere yol açar.

Wang et al. (J. Wang et al., n.d.), rektum kanserinde (RK) tümör birikimlerini tahmin etmede topluluk öğrenme modellerinin performansını değerlendirmiştir. Bu çalışmada (**Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**), T2 ağırlıklı ve görünür d ifüzyon katsayılı görüntülerden çıkarılan radyomik özellikler torbalama-birleşik öğrenme modeli (rastgele orman), boosting-birleşik öğrenme modeli (XGBoost, AdaBoost, LightGBM ve CatBoost) ve oylama-birleşik öğrenme modeli (5 sınıflandırıcının entegrasyonu) uygulanıp ve on kat çapraz doğrulama ile grid arama kullanılarak optimize edilmiştir. Oylama topluluğu öğrenme modeli (VELM), 0,875 AUC ve 0,800 doğruluk ile test kohortunda en iyi performansı göstermiştir. Kalibrasyon grafikleri VELM'in kararlılığını doğrularken, t-SNE görselleştirmesi radyomik özelliklerin net bir şekilde kümelandiğini göstermiştir. Karar eğrisi analizi, VELM'in bir dizi klinik eşikte üstün net faydasını daha da doğrulamış ve RC'de klinik karar verme için güvenilir bir araç olma potansiyelinin altını çizmiştir.

4.2. Derin Öğrenme Teknikleri

Derin öğrenme teknikleri ve daha geniş anlamda yapay zekâ algoritmaları, radyoloji alanında devrim yaratma konusunda büyük bir potansiyele sahiptir.

Tıbbın diğer birçok alanından farklı olarak, görüntülemedeki neredeyse tüm veriler- hem analiz için kullanılan birincil veriler hem de radyologlar tarafından üretilen çıktılar- dijitaldir ve bu da onları yapay zeka algoritmaları tarafından analiz edilmeye son derece uygun hale getirir. Görüntü yorumlamadaki en zorlu görevlerden biri hastalık tespiti, özellikle de anormalliklerin normal anatomik yapılardan hızlı bir şekilde ayırt edilmesidir. Bir anormallik tespit edildiğinde, sonraki görev bir tanı koymayı ve uygun hastalık yönetimini planlamayı içerir. Bu genellikle boyut, konum, sinyal özellikleri, sınırlar ve zaman içindeki değişiklikler gibi çok sayıda özelliğin entegre edilmesini içerir.

Radyolojide görüntü analizinin merkezi önemi göz önüne alındığında, son yıllarda araştırma faaliyetlerinde bir artışa neden olan derin öğrenme uygulamaları için ideal bir alandır. Bu bölümde, özellikle evrimsel sinir ağlarına (CNN'ler) odaklanılarak rektal kanserde derin öğrenmenin temel kavramları tanıtılmaktadır (Mazurowski ve ark., 2019).

Derin öğrenme, önceden tanımlanmış talimatlara dayanmak yerine büyük miktarda veriden öğrenerek karmaşık görevleri ele almak için birbirine bağlı birimler kullanan bir dizi yapay zeka tekniğidir. Bu algoritmalar, görüntülerde nesne konumlandırma ve sınıflandırma, doğal dil anlama ve oyun oynama gibi görevlerde özel bir yeterlilik göstermektedir. Konvolüsyonel sinir ağları (CNN'ler) birkaç on yıldır var olmasına rağmen, son beş yıldaki önemli ilerlemeleri onları sadece teorik kavramlar olmaktan çıkarıp yapay zeka alanında baskın algoritmalar haline getirmiştir. Derin öğrenmenin görüntüleri analiz etme kapasitesi, onu radyoloji alanında potansiyel olarak değerli bir araç olarak tanımlamıştır. Bu algoritmaların tıbbi görüntülemede uygulanması başlangıçta uzmanlık edinme ve veri kümelerinin mevcudiyeti gibi engellerle karşılaşmış olsa da, son yıllarda önemli ilerlemelere tanık olmuştur. Derin öğrenmenin radyolojinin geleceğinde çok önemli bir rol oynayacağı artık yaygın olarak kabul edilmektedir.

Hinton tarafından 2006 yılında tanıtılan derin öğrenme (DL), birden fazla gizli katmana sahip mimariler oluşturmaya, bunları büyük veri kümeleri üzerinde eğitmeye ve doğru sınıflandırma ve tahmin için temsili özellikler çıkarmaya odaklanan önemli bir makine öğrenimi dalıdır (Hinton ve ark., 2006). DL iş akışı tipik olarak üç aşamadan oluşur:

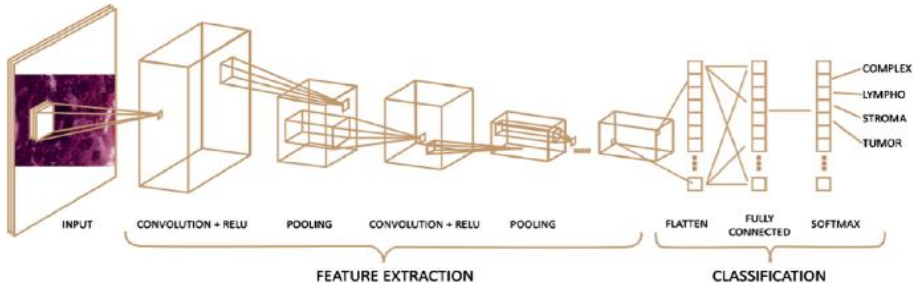
1. Görüntü Verilerinin Ön İşlemden Geçirilmesi: Bu, gürültü azaltma, veri normalleştirme ve özellik seçimi/çıkarması içerir.
2. Model Eğitimi, Doğrulama ve Test: Veri seti eğitim, doğrulama ve test setlerine ayrılır. Eğitim seti veri parametrelerini öğrenmek için kullanılır, doğrulama seti aşırı uyumu önlemeye yardımcı olur ve test seti model performansını değerlendirir.

3. Model Değerlendirmesi: Bu adım, modelin araştırma hedeflerini karşılayıp karşılamadığını belirler.

Geleneksel yapay sinir ağları üzerine inşa edilen CNN'ler, görüntü tanıma için derin öğrenme tekniklerinin uygulanmasında çok önemlidir. Temel mimari beş temel bileşen içerir: giriş katmanı, evrişim katmanı, havuzlama katmanı, tam bağlantılı katman ve çıkış katmanı. Giriş katmanında görüntü, boyutları görüntü boyutunu ve derinliği renk kanallarının sayısını temsil eden bir 3D piksel matrisi olarak iletilir. Konvolüsyonel Katman, görevle ilgili üst düzey özellikleri otomatik olarak çıkarır. Havuzlama katmanı, hesaplama yükünü azaltmak için giriş özellik haritalarını seyrek olarak işler. Dönüşümlü evrişim ve havuzlama katmanları, özellikleri sırayla çıkarır ve analiz eder. Ardından, Tam Bağlantılı Katman, belirli görev sınıflandırması için bir sınıflandırıcı görevi görür. Son olarak, çıktı katmanı ilgili kategoriler için olasılıksal puanlar sağlar.

CNN'lerin temel özelliklerinden biri, görsel korteks nöronlarının uyarılara yanıt verme şeklini taklit ederek, her nöronun yalnızca belirli bir alıcı alandan gelen verileri işlediği konvolüsyonel katmanları kullanmalarıdır. Bu katmanlar içinde, CNN'ler giriş görüntüsüne ağırlıkları tarafından tanımlanan filtreler (konvolüsyonel çekirdekler) uygular. Bu işlem, filtre ağırlıklarının görüntü boyunca farklı konumlardaki piksel değerleriyle eleman bazında çarpımını içerir ve bu da etkili bir şekilde bir tür uzamsal filtreleme veya özellik çıkarımı gerçekleştirir.

CNN'lerin bir diğer temel bileşeni de Şekil 5'te gösterildiği gibi havuzlama katmanlarıdır. Bu katmanlar temsilin uzamsal boyutlarını ve dolayısıyla hesaplama karmaşıklığını azaltırken aynı zamanda giriş verilerindeki küçük kaymalara karşı öteleme değişmezliği sağlar. Örneğin maksimum havuzlama, önceki katmanın çıktılarının bir alt kümesinden maksimum değeri korur, böylece en önemli özellikleri muhafaza eder.



Şekil 5: CNN mimarisi (Ibrahim ve ark., 2021)

Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı. 5'te bir CNN'in basitleştirilmiş mimarisini göstermekte ve bileşenlerini vurgulanmaktadır; konvolüsyonel katmanlar, havuzlama katmanları ve tam bağlı katmanlar. Ağ boyunca uzamsal bilgileri korumak için uyarlanmış tam evrişimli sinir ağları (FCN'ler) kullanılarak

görüntü segmentasyonu gibi belirli görevlere uyacak şekilde çeşitli CNN mimarileri geliştirilmiştir.

Genel olarak CNN'ler, karmaşık görsel verilerden hiyerarşik temsilleri otomatik olarak öğrenme ve çıkarma yeteneklerinden yararlanarak görüntü ile ilgili görevler için derin öğrenmede önemli bir ilerlemeyi temsil etmektedir. Eğitim süreci Evrişimsel Sinir Ağları (CNN'ler), belirli görevleri etkili bir şekilde gerçekleştirmek için girdi verilerine dayalı olarak tek tek nöronların ağırlıklarının ayarlanmasını içerir. Eğitim olarak da bilinen bu öğrenme süreci, CNN'lerin örneklerden öğrenmesi ve doğru tahminler yapması için çok önemlidir.

En yaygın yaklaşım olan denetimli öğrenmede, her eğitim örneği bir etiketle (örneğin, iyi huylu veya kötü huylu tümör) eşleştirilmiş giriş verilerinden (örneğin, bir tümörün T2 ağırlıklı MRI görüntüsü) oluşur. CNN, giriş görüntüsünü katmanları aracılığıyla işler ve mevcut ağırlıklarına dayanarak bir çıktı (örneğin, kötü huylu olma olasılığı) üretir. Tahmin edilen bu çıktı gerçek etiketle (örneğin iyi huylu için 0, kötü huylu için 1) karşılaştırılır ve bir hata hesaplanır. Amaç, ağırlıkların ayarlayarak bu hatayı en aza indirmektir.

Ağırlıkların ayarlanması, hata geri yayılımı veya stokastik gradyan inişi adı verilen bir teknik kullanılarak yapılır. Esasen, hata sinyali ağ boyunca geriye doğru yayılır ve ağırlıklar hatayı azaltan yönde güncellenir. Tipik olarak bu güncellemeler, öğrenmeyi stabilize etmek için her bir örnekten sonra değil, ağa bir grup örnek sunulduktan sonra yapılır.

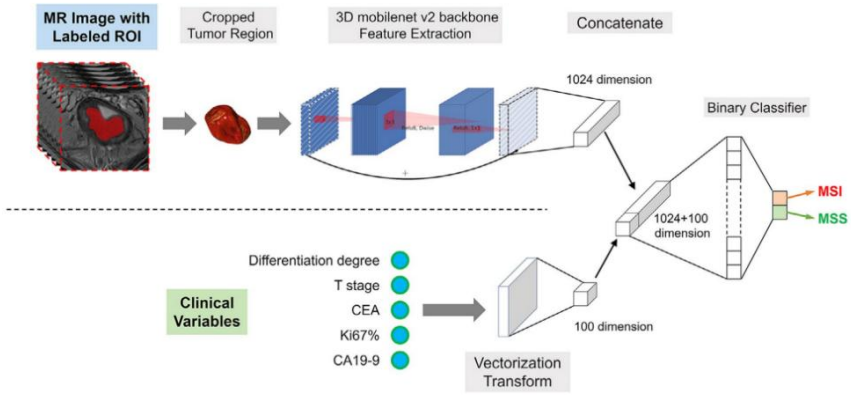
Bir CNN'i sıfırdan eğitmek, rastgele ağırlıklarla başlamayı ve eldeki probleme özgü mevcut eğitim verilerini kullanarak bunları optimize etmeyi içerir. Bununla birlikte, bir CNN'deki çok sayıda parametre (genellikle milyonlarca) ve göreve özgü sınırlı miktarda eğitim verisi nedeniyle, aşırı uyum riski vardır. Aşırı uyum, ağ eğitim verilerinde iyi performans gösterdiğinde ancak yeni, görünmeyen verilere genelleme yapamadığında ortaya çıkar.

Aşırı uyumu ele almak ve eğitim verimliliğini artırmak için iki temel yaklaşım geliştirilmiştir: transfer öğrenimi ve kullanıma hazır özellikler. Transfer öğrenimi, bir CNN'in büyük ve çeşitli bir veri kümesinde (örneğin ImageNet) ön eğitimden geçirilmesini ve ardından hedef göreve özgü daha küçük bir veri kümesinde ince ayar yapılmasını içerir (J. Deng ve ark., 2009). Bu, belirli bir görevdeki performansını artırmak için daha geniş veri kümesinden elde edilen bilgiden yararlanır. Yeniden kullanılan ağ, tıbbi veriler üzerinde gerçekleştirilebilir ve umut verici sonuçlar gösterir (H. Yu ve ark. 2021), (H. C. Shin ve ark., 2016). Özellikle, ImageNet veri kümesi (~1,2 milyon eğitim RGB görüntüsü) üzerinde eğitilen modeller, mevcut veri kümesinin sınırlı olduğu endoskopik görüntüleri eğitirken transfer eğitimi öğrenimini uygulamak için uygun olabilir (H. Yu ve ark., 2021).

Artık Ağlar (ResNets) ve başlangıç (inception) modelleri gibi CNN mimarilerindeki son gelişmeler, radyolojideki derin öğrenme uygulamalarının verimliliğini ve performansını daha da artırmıştır. Bu mimariler, doğruluğu veya Eğri Altındaki Alan (AUC) puanlarını iyileştirirken aşırı uyum riskini azaltma yetenekleriyle karakterize edilir.

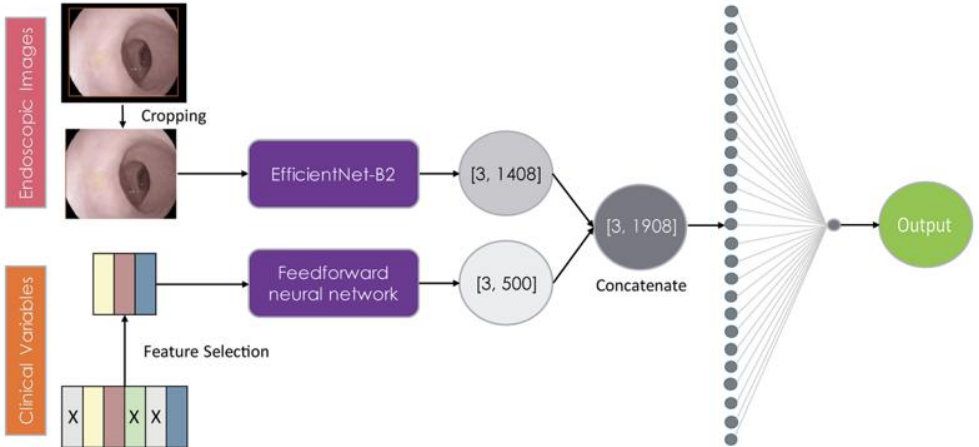
Daha yüksek doğrulukta değerlendirme elde etmek için, derin öğrenme temelli ve doğrulama içeren bir YZ tanı sistemi performansını ROC eğrisi üzerinden değerlendirmelidir. AUC'nin $\geq \%90$ olması, sistemin klinik uygulamaya hazır olduğuna işaret edecektir. Önerilen sistem, rektum kanserinde dört temel gösterge için olasılıkları hesaplayacaktır: T evresi, N evresi, çevresel rezeksiyon marjini (CRM) ve ektramural venöz invazyon (EMVI). Bu olasılıklar, ameliyat öncesi evreleme ve tedavi planlamasında klinisyenlere karar desteği sağlar (Gao ve ark., 2021). Radyomik özelliklerin analizi için bir diğer yaklaşım da rektum kanserinin patolojik özelliklerini öngören derin öğrenme modelleridir (Ma ve ark., 2019). Nitekim Jiang ve ark. (2023), tedavi öncesi T2-ağırlıklı görüntülerden segmente edilen tümör hacimlerine dayanarak rektum kanserli hastalarda sağkalımı tahmin eden ve doğrulanan bir DL-tabanlı risk puanı geliştirmiştir.

Google tarafından tanıtılan MobileNet, sınırlı hesaplama kaynaklarıyla çalışırken yüksek doğruluğu koruyan mobil ve gömülü görme uygulamaları için tasarlanmış bir derin öğrenme mimarisidir (Howard ve ark., 2017). Diğer mimarilerden farklı olarak hem hesaplama hem de model boyutunda önemli azalmalar elde etmesini sağlayan derinlik tabanlı ayrılabilir konvolüsyon kullanır. MobileNetV1, MobileNetV2 ve MobileNetV3 gibi MobileNet modelleri nesne algılama, görüntü sınıflandırma ve anlamsal segmentasyon gibi çeşitli gerçek zamanlı uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır ve bu da onları mobil cihazlarda ve uç bilişim platformlarında dağıtım için ideal hale getirmektedir. Zhang ve arkadaşları, (W. Zhang ve ark., 2021a) mikro uydu durumunu sınıflandırmak için MobileNetV2 mimarisini değiştirmiştir. Mikrosatellit instabilitesi (MSI) ve stabilitesi (MSI) rektum kanserinde biyobelirteç görevi görmektedir. Bu MSS veya MSI aralıklarını sağlayan en önemli bölgeleri düzenlemek ve görüntülerdeki önemli bölgelerin görsel bir temsilini vermek için renkli ısı haritaları olarak görüntülenen belirginlik haritalarını elde etmek için Gradyan Ağırlıklı Sınıf Aktivasyon Haritalama (Grad-CAM) adı verilen görsel bir açıklama aracı kullanılır. Hem klinik değişkenleri hem de ham T2WI MR görüntülerini Şekil 6'da görüldüğü gibi alırlar.



Şekil 6: Zhang ve arkadaşları tarafından yapılan kombine derin öğrenme çalışması (W. Zhang ve ark., 2021a)

EfficientNet, önceki ConvNet'lere kıyasla daha yüksek doğruluk ve verimlilik sunan bir CNN ailesidir. Bunu, derinlik–genişlik–çözünürlüğü birlikte ölçekleyen (compound scaling) yeni bir yöntemle başarır (Tan ve Le, 2019). Haak ve arkadaşları, neoadjuvan tedavi sonrası rektum kanserli hastalarda endoskopik görüntülere dayalı derin öğrenme yöntemleriyle CRT sonrası tam klinik yanıt (CR) tespitinde yüksek doğruluk bildirmiştir; Şekil 7'deki birleşik model, yalnızca klinik verilere ya da yalnızca endoskopiye dayalı modellere üstün gelmiştir (Haak, 2022a). Çalışmada EfficientNet-B2, Xception, MobileNetV2, DenseNet121, ResNet50, InceptionV3 ve Inception-ResNetV2 ile karşılaştırılmış; karşılaştırma sonuçları Tablo 3'te sunulmuştur.



Şekil 7: Haak ve diğerlerinin birleşik model mimarisi (Haak ve ark., 2022a)

Ağ derinliği arttıkça, doğruluk doygunluğa ulaşır ve ardından hızla düşer. Beklenmedik bir şekilde, böyle bir bozulma aşırı uyumdan kaynaklanmaz ve uygun şekilde derin bir modele daha fazla bölme katmanı daha yüksek eğitim hatasına yol açar. ResNet50 (He ve ark., 2015), derin kapsama çerçevesini tanıtarak yıkıcı olmayan öğrenmeyi ele almaktadır. "ResNet" katmanlar arasında yardımcı bağlayıcılara sahiptir ve önceki katmanları genişleterek sonraki katmanların girdisine erişim sağlar (Shafiq & Gu, 2022). Chen ve arkadaşları, DCNN ağını dağıtmak ve endoskopik görüntülerden canlı kanser hücreleri olmayan tümörü veya kanser hücreleri olan tümörü tüketmek için ResNeSt-50 adlı bir ağ önermiştir (X. Chen ve ark., 2022)

Tablo 3: Sonuçlar (Haak ve ark., 2022a)

	Xception	MobileNet	DenseNet 121	ResNet50	InceptionV3	Inception ResNetV2	EfficientNet-B2
AUC (95% CI)	0.81 (0.78–0.84)	0.81 (0.77–0.84)	0.78 (0.74–0.82)	0.78 (0.74–0.81)	0.81 (0.77–0.84)	0.76 (0.72–0.80)	0.83 (0.80–0.86)
Accuracy (95% CI)	0.75 (0.71–0.79)	0.70 (0.66–0.74)	0.69 (0.65–0.73)	0.67 (0.63–0.71)	0.72 (0.68–0.76)	0.69 (0.65–0.73)	0.75 (0.72–0.79)
PPV (95% CI)	0.74 (0.71–0.78)	0.67 (0.63–0.71)	0.71 (0.67–0.74)	0.67 (0.63–0.71)	0.73 (0.69–0.77)	0.67 (0.63–0.71)	0.74 (0.70–0.77)
NPV (95% CI)	0.78 (0.74–0.80)	0.70 (0.66–0.74)	0.71 (0.67–0.75)	0.72 (0.68–0.75)	0.74 (0.70–0.77)	0.71 (0.67–0.75)	0.77 (0.74–0.80)
Sensitivity (95% CI)	0.79 (0.75–0.82)	0.76 (0.73–0.80)	0.68 (0.64–0.72)	0.73 (0.70–0.77)	0.71 (0.67–0.75)	0.68 (0.64–0.72)	0.77 (0.73–0.80)
Specificity (95% CI)	0.73 (0.69–0.77)	0.73 (0.70–0.77)	0.72 (0.68–0.76)	0.66 (0.62–0.70)	0.72 (0.69–0.76)	0.71 (0.67–0.75)	0.75 (0.72–0.79)

CI Confidence interval, AUC Area under the ROC curve, PPV Positive predictive value, NPV Negative predictive value

ResNet-101 (He ve ark.), artan derinliği (101 katman) ve önceki ağlardan daha iyi performans göstermesini garanti eden artık blokları nedeniyle ünlüdür (He ve ark., 2016).

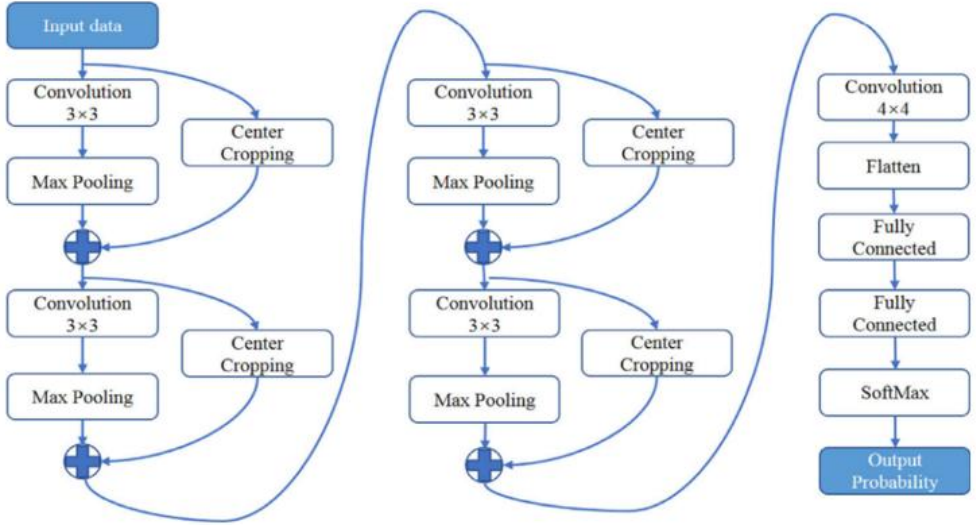
"DenseNet" ResNet ile benzer bir konsepte sahiptir ve bir sonraki katmana bağlantılarını oluşturmak için önceki katmanların tüm çıktılarını birleştirir (G. Huang ve ark., 2016). DenseNet ayrıca süreçlerin patlaması veya çözülmesi sorununun üstesinden gelir ve ResNet'e göre daha az programlama süresi ve bellek gerektirir.

InceptionV3 (Szegedy ve ark., 2015a.), görüntü tanıma görevlerinde verimliliği ve performansı artırmak için karmaşık bir evrişimli sinir ağı (CNN) mimarisidir. Google tarafından geliştirilen bu model, aynı anda birden fazla değişiklik özelliğini korumak için değişken filtre boyutlarına sahip paralel evrişimli katmanlar kullanan Inception modüllerini içerir. Mimari, programlama maliyetinden tasarruf etmek için standart geliştirmeleri daha küçük, daha verimli işlemlere ayıran faktöriyel geliştirmeleri kullanır. Inception v3'ün mimarisi, ortaya çıkış için softmax çıkışlı bir dizi başlatma bloğu, indirgeme katmanları, yardımcı sınıflandırıcılar ve tamamen bağlı katmanlar içerir. Gelişmiş seçeneklerle büyük değişim veri kümeleri üzerinde sınıflandırılan Inception v3, görüntü tanıma kıyaslamalarında son teknoloji performansa ulaşarak görüntü tanımlamadan nesne algılamaya ve aktarım için özellik oluşturmaya kadar çeşitli

bilgisayarla görme uygulamaları için güçlü bir araç haline gelmiştir (Szegedy et al., 2015b). Inception, çok fazla katman ekleme sorununu ortadan kaldırır. "InceptionResNet", Inception ve ResNet'in temel modüllerini birleştirmektedir (Szegedy ve ark., 2016). "Xception" Inception'ın geliştirilmiş bir versiyonudur ((Chollet, 2016).

Liu ve arkadaşları rektum kanseri tümör tomurcuklanma derecesi tahmini için altı transfer modeli (DenseNet 121, ResNet 18, ResNet 34, ResNet 50, ResNet 101 ve Vgg11 dahil) kullanmış ve sonuç olarak Vgg11 modeli diğer klasik CNN'lere kıyasla daha güçlü genelleme ve tahmin yeteneği göstermiştir (Z. Liu ve ark., 2024). Vgg11 modelinin Grad-CAM görselleştirmesi, rektum kanseri görüntülerindeki temel tümör özelliklerini tanımlama ve analiz etme konusundaki ilerlemeyi doğrulamaktadır. Bu şekilde, model yalnızca teknik düzeyde tanıma bilirlirliklerini göstermekle kalmaz, aynı zamanda doktorlara tümörün patolojik özelliklerini anlamak için daha kolay bir yol sağlar.

Zhu ve arkadaşları tarafından önerilen derin öğrenme modeli Şekil 8 'de sunulmuştur (H. T. Zhu ve ark., 2020). Bu mimari, bir özellik çıkarma birimi, bir maksimum havuzlama katmanı ve paralel bir evrimden sonra bir kırpma katmanı ile tasarlanmıştır. Kırpma katmanı, görüş merkezi 1/4 bölgesini bir sonraki katmana çıkarır ve bunu maksimum çerçeveleme katmanının çıktısıyla birleştirir. Bu yapı hem tüm görüntüden hem de merkezi alandan gelen bilgileri korumayı başarır. Özel çıkarma birimlerinin 4 iterasyonundan sonra, son olarak yoğun bağlantılı katmanlar ve bir SoftMax fonksiyonu 0 ile 1 arasında bir olasılık üretmek için kullanılır.



Şekil 8: Derin öğrenme için sinir ağlarının mimarisi (H. T. Zhu ve ark., 2020)

4.3 Segmentasyon için Derin Öğrenme Modelleri

Rektal kanser görüntü analizinde tümör segmentasyonu, modelin doğru bir şekilde tümörü tanımlayabilmesi için kritik bir adımdır. Manuel segmentasyon, en yaygın kullanılan yöntem olup, radyologların MR görüntülerini dilim dilim inceleyerek tümör bölgelerini elle işaretlediği bir süreçtir. Manuel segmentasyon, hassasiyet ve doğruluk açısından üstün olsa da oldukça zaman alıcıdır ve uzmanlar arasında değişkenlik gösterebilir, bu da modelin genelleme yeteneğini olumsuz etkileyebilir.

Çoğu çalışmada ilgi bölgesi (ROI - Region of Interest), genellikle tümör sınırı olarak belirlenirken, bazı araştırmalarda pozitif lenf nodları (LN) ve peritoneal bölgeler de analiz kapsamına alınmaktadır (Ouyang et al., 2023). Bu ek analizler, kanserin yayılımının daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine ve hastalığın ilerleme sürecine dair daha fazla bilgi edinilmesine yardımcı olmaktadır. Özellikle otomatik segmentasyonun gelişimi, klinik süreçlerde yapay zeka destekli karar mekanizmalarının daha hızlı ve doğru sonuçlar sunmasını sağlayarak hastaların erken teşhis ve tedavi süreçlerini iyileştirme potansiyeline sahiptir.

CNN modelleri, insan ek açıklamaları ile çeşitli tedavi görüntülerinden el yapımı olmayan özellikler çıkarır. CNN modelleri bu derin özellikleri işleyerek segmentasyon, algılama, ortaya çıkarma ve potansiyel tahmin gibi işlemleri gerçekleştirebilir. Bu alt bölümde, tedavi görüntüsü segmentasyonu için bir sinir ağını eğitmeye yönelik temel adımlar özetlenmektedir. Görüntü segmentasyonunda, 2D veya 3D görüntülerden açıklamalı ROI'ler elde etmek çok önemlidir. Bu işlem orijinal boyutları birleştirir, bir maske görüntüsü oluşturur ve ROI'yi belirtmek için piksellere belirli değerler atar (örneğin, arka plan için 0 ve ROI için 1). Geleneksel görüntü segmentasyonu benzerlik tabanlı, kenar tabanlı, granülerite tabanlı ve kümeleme tabanlı gruplara ayrılır. Bu kopyalar doku ve şekil gibi temel kalıcılığı korur ve genellikle farklı unsurları birbirinden ayıran ayrımları dikkate almaz. Tıbbi görüntülemelerde, özellikle de MRG'de, görüntü segmentasyonu organların, alt yapıların veya kesitlerin çıkarılması için önemlidir ve genellikle özellik çıkarımı ve temsili için bir ön koşuldur. Araştırmacılar, geleneksel modelleri birleştirmek ve basitleştirmek için insan etiketli veri kümelerinin oluşturulmasını tamamlamaktadır. Tipik olarak uç organların ana hatları çizilirken, sahadaki radyologlar tümör ve lezyonların ana hatlarını çizilir. Yaygın açıklama platformları arasında 3D Slicer (3D Slicer Image Computing Platform | 3D Slicer, t.y.) ve ITK-Snap (ITK-SNAP Home, t.y.) yer alır ve açıklamalar tipik olarak aksiyal görünümde ve koronal/sagittal görünümde kesit dilimlerinde geliştirilir.

Rektal kanser görüntü segmentasyonu için yaygın olarak kullanılan bir yöntem, her vokselin etrafında merkezlenen küçük görüntü yamalarına (hem 2D hem de 3D) dayalı voksel üretimini içerir. Bu yöntem verimli olmasına rağmen,

örtüşen görüntü yamalarının gereksiz evrimi nedeniyle planlama yoğun bir sistemdir. Ayrıca, doğru segmentasyon için önemli olabilecek diğer görüntü yamalarına göre piksel yamalarını veya uzamsal ilişkileri küresel olarak kesmek de mümkündür. Bu sorunları ele almak için tam evrişimli sinir ağları (fCNN'ler) ortaya çıkmıştır. Voksel yöntemlerinin aksine, fCNN'ler segmentlerinin tamamını veya büyük bölümlerini eş zamanlı olarak işler ve tek tek pikselleri bağımsız olarak segmentlere ayırmak yerine 2 boyutlu bir etiket haritası (segmentasyon haritası) oluşturur. Bu, ana hatlarıyla belirtilen görüntü bölgelerini tek bir geçişte analiz ederek tipik olarak programlama fazlalığını azaltır. U-Net ve Fully Convolutional DenseNet gibi mimariler, ağ kodlayıcı ve kod çözücü aralıkları arasındaki mesafeler için atlama bağlantı aralığı gibi yenilikler dahil edilerek radyolojik uygulamalara başarıyla uyarlanmıştır. Radyolojide, fCNN'ler çeşitlilik varyasyonları, tedavi veri kümelerine uyarlanmış segmentasyon bölümleri ve sınıf dengesizliği durumları nedeniyle sıklıkla araştırılmaktadır. 3D verilerle uğraşırken, yaygın bir strateji, kayıtlı 2D dilimlerin depolanmasını ve ardından bunların bir 3D segmentasyon haritasına bölünmesini içerir. Bu yaklaşım, etkili eğitim için önemli miktarda veri gerektiren 3D fCNN'lerin daha etkili olmasını önler. Ayrıca, özellikle görüntü dilimleri arasındaki uzamsal segmentasyonun kritik olduğu senaryolarda, tıbbi görüntüleme segmentasyonu için tekrarlayan sinir ağları (RNN'ler) araştırılmıştır.

Tümör segmentasyonu, görüntüdeki her pikselin kategorisini tanımlamalıdır. Ancak, tümör segmentasyonu söz konusu olduğunda CNN'in iki ana zorluğu vardır. Birincisi, CNN'de tekrarlanan havuzlama ve adımlama işlemleri, özellik haritasının kaybolmasına (giriş korumasının 1/32'sine kadar) ve ayrıntılı bilgi kaybına neden olur. Azaltılmış dağılımdan kurtulmak için yaygın bir çözüm, kodlayıcının havuzlama katmanlarıyla uzamsal boyut aralıklarını azalttığı ve kod çözücünün dekonvolüsyonlarla tam uzamsal kurtarma işlemlerini geri kazandığı U-Net (Ronneberger ve ark., 2015) gibi kodlayıcı-kod çözücü mimarisini kullanmaktır. U-Net ağı iki ana gruptan oluşmaktadır: sıkıştırma yolu ve genişletme yolu. Sıkıştırma yolu, özellik çıkarma ve özellik haritalarının tükenmesini azaltma avantajlarını sağlar. Sıkıştırma yolundaki her bir konvolüsyon, ardışık 3×3 konvolüsyondan, ardından bir ReLU aktivasyon biriminden ve bir maksimum havuzlama katmanından oluşur. Bu yapı, anında birden çok kez iteratif olarak uygulanır. Bununla birlikte, dekonvolüsyonlar programlama süresini önemli ölçüde artırır ve segmentasyon bölümlerini azaltır. İkinci zorluk ise farklı hastalık tümörlerinin anlık olarak çok büyük olmasıdır. Bu nedenle, küçük nesneler göz ardı edilebilirken, büyük nesneler konvolüsyon alıcılarının alanları tarafından boğulabilir.

Derin Sinir Ağları (DNN), geleneksel yapay sinir ağlarına kıyasla daha fazla katmana sahip olması nedeniyle daha karmaşık özellikleri öğrenme yeteneğine sahiptir. Bu ağlar, özellikle Bibault (Bibault et al., 2018) ve Jin (Jin et al., 2022)

gibi araştırmacılar tarafından geliştirilen modellerde, rektal kanserin radyolojik görüntülerinden anlamlı desenler çıkararak hastaların tedaviye yanıtını tahmin etme amacıyla kullanılmıştır. DNN'ler, yüksek boyutlu verilerle çalışabilme kapasitesi ve manüel özellik mühendisliğine duyulan ihtiyacı azaltması gibi avantajlara sahiptir. Ancak, yüksek hesaplama gücü gerektirmesi, büyük veri kümeleri olmadan aşırı öğrenme (overfitting) riski taşıması ve yorumlanabilirliğinin düşük olması gibi bazı sınırlamaları bulunmaktadır.

Geleneksel U-Net ağı, Li tarafından yeni bir U-Net mimarisinin tanıtılmasıyla geliştirilmiştir (D. Li ve ark., 2022). Önerilen model, kodlayıcıyı Sıkıştırma ve Uyarma ağırları (SENet) ile değiştirerek ve son kodlayıcıdan sonra küresel bir havuzlama katmanı ekleyerek yeni bir yaklaşım getirmektedir. Ek olarak, uzamsal ve kanal sıkıştırma, her kod çözücüdeki uyarma dikkat mekanizması modülleri ve ardından her kod çözücünün çıkış sonuçlarının bağlanmasıyla elde edilir. Araştırma bulguları, bu modelin doğru ve verimli RC segmentasyonunun yanı sıra kontur segmentasyonunu da mümkün kıldığını göstermektedir.

Li ve ekibi tarafından geliştirilen TA-Net (Texture-Aware Network), görüntülerin dokusal özelliklerini daha iyi koruyarak, rektal kanserli ve sağlıklı dokuların daha etkili bir şekilde ayrıştırılmasını sağlamaktadır (Li ve ark., 2022). Ancak, bu gelişmiş modellerin aşırı öğrenmeye duyarlı olması ve yüksek miktarda hesaplama gücü gerektirmesi, klinik uygulamalar için adaptasyonlarını zorlaştırmaktadır.

Sonuç olarak, DNN tabanlı modeller, rektal kanser hastalarının tedaviye yanıtlarını tahmin etme konusunda güçlü bir potansiyele sahipken, CNN tabanlı segmentasyon modelleri, tümörleri daha hassas bir şekilde tespit ederek klinik karar süreçlerini iyileştirmektedir. Gelecekteki çalışmalar, U-Net, TA-Net ve DeepTOP gibi gelişmiş modellerin daha geniş çaplı veri kümeleriyle eğitilmesi ve otomatikleştirilmiş segmentasyon süreçlerinin optimize edilmesi üzerine yoğunlaşmalıdır. Ayrıca, SHAP gibi açıklanabilir yapay zeka (Explainable AI) yöntemlerinin kullanılması, modellerin klinik karar alma süreçlerine daha güvenilir bir şekilde entegre edilmesini sağlayacaktır. Bu gelişmeler, rektal kanser teşhisi ve tedavi planlamasında yapay zeka destekli sistemlerin etkinliğini artırarak hasta sonuçlarını iyileştirme potansiyeline sahiptir.

Isensee ve arkadaşları tarafından önerilen nnUNet, ön işleme, ağ tasarımı, eğitim ve son işleme dahil olmak üzere herhangi bir yeni görev için kendini otomatik olarak yapılandıran derin öğrenme tabanlı bir segmentasyon yaklaşımıdır (Isensee ve ark., 2020). nnUNet, uluslararası biyomedikal segmentasyon yarışmalarında kullanılan 23 genel veri kümesi üzerinde mükemmel performans göstermiştir. Cai ve arkadaşları tam otomatik bir derin öğrenme işlem hattını tanıtmıştır. Boru hattı UNet, kendi kendini yapılandıran bir DL tümör segmentasyon modeli ve MLNet (L. Cai ve ark., 2024) olarak adlandırılan UNet tarafından öğrenilen çok seviyeli görüntü temsillerini kullanan

bir sınıflandırma modelinden oluşmaktadır. U-Net'teki atlama bağlantıları fikrine benzer şekilde SegNet, 2016 yılında Badrinarayanan ve arkadaşları tarafından önerilmiştir (Badrinarayanan ve ark., 2017). Bu algoritmadaki ağ mimarisinin temel katkısı, aşağı örnekleme havuzlama işlemleri sırasında indeks bilgilerini depolayan ve yukarı örnekleme işlemleri sırasında ilgili bilgileri kurtarmak için bu indeksleri kullanan bir kodlayıcı-kod çözücü olarak işlev görmesinde yatmaktadır.

Trabeschi ve arkadaşları, (Trabeschi ve ark., 2017) pikselleri doğrudan konvolüsyonel havuzlama ve ardından tam bağlantılı bir katman ve bir softmax işlevi ile sınıflandırmıştır. Trabeschi ve arkadaşları, RC hastalarının T2WI + DWI (B değerleri 1.000 ve 0 olan) görüntülerini entegre etmek için CNN tabanlı bir DL modeli kullanmış ve iki görüntü setini deforme edilebilir kayıt yoluyla hizalamıştır.

Irving ve arkadaşları, süperpiksel yaklaşımı ve dinamik kontrastlı MRG (DCE-MRI) kullanarak RC hastalarında tümör segmentasyonu için otomatik bir çerçeve geliştirmiştir (Irving ve ark., 2016). Bu çerçeve, süperpiksellerin sınırlarını hassaslaştırmak için global anatomik morfolojik kısıtlamalar içermekte ve DCE-MRI segmentasyon görevlerinde mükemmel performans sağlamaktadır. Dahası, bu yöntem diğer DCE-MRI süperpiksel segmentasyon problemlerine genişletilebilir.

Jian ve arkadaşları, segmentasyon modeli için girdi olarak rektal MR görüntüsünün tamamını kullanmış ve beş konvolüsyonel modül oluşturmuştur. Her modül, daha sonra rektal tümörlerin nihai segmentasyon sonucunu oluşturmak için birleştirilen karşılık gelen bir tahmini sonuç haritası (Jian ve ark., 2018).

Kim ve arkadaşları, segmentasyon modeli olarak geleneksel bir U-Net mimarisi kullanmış ve hem rektumu hem de tümör bölgelerini otomatik olarak tanımlamak için tüm rektal MRI görüntüsünü girdi olarak kullanmıştır (Kim ve ark., 2019). Daha sonra, rektal MR görüntüsündeki tümörün evresini (T2 veya T3) belirlemek için bu modelden elde edilen bölütlenmiş çıktıyı bir sınıflandırma ağı için girdi olarak kullanmışlardır.

Zhu ve arkadaşları, 300 rektum kanseri hastasının DWI görüntüleri üzerinde bir 3D U-Net modelini eğitmek için tamamen denetimli bir paradigma kullanmış ve 0,675'lik bir Dice katsayısı segmentasyon skoru elde etmiştir (H. T. Zhu ve ark., 2021b). Bu bulgular, RC hastalarının DWI görüntülerinde tümör segmentasyonu için DL modelinin yüksek doğruluğunu ve etkinliğini göstermektedir. Rektal MR görüntülerinde rektal tümörlerin sınırlı uzamsal kapsamı geleneksel CNN'lerin hem tümöre özgü bilgileri hem de bağlamsal ayrıntıları etkili bir şekilde yakalaması için bir zorluk oluşturmaktadır. Ayrıca, tümörü çevreleyen gizli özelliklerin dahil edilmesi, RC'nin kapsamlı bir analizi için çok önemlidir. Bu sorunu ele almak için bazı araştırmacılar, rektal MR

görüntüsünün tamamından özellik çıkarmak için farklı boyutlarda konvolüsyon çekirdekleri kullanmış ve böylece ince tümör özelliklerine ve çevresindeki gizli özelliklere aynı anda dikkat edilmesini sağlamıştır.

Men ve arkadaşları tarafından tanıtılan önerilen çok ölçekli konvolüsyonel mimari, doğru RC segmentasyonu için temel çerçeve olarak VGG-16'yı kullanmaktadır (Men ve ark., 2017). Ana ağın hem başına hem de sonuna genişletilmiş konvolüsyonlar eklenerek rektal görüntülerdeki çeşitli ölçeklerdeki özellikler etkili bir şekilde çıkarılabilir. Özellikle, ilk genişletilmiş konvolüsyonlar düşük seviyeli bağlamsal bilgileri yakalarken, sonrakiler yüksek seviyeli bağlamsal bilgileri yakalar. Daha sonra Men ve arkadaşları, RC'nin doğru segmentasyonu için ResNet-101'e dayalı bir CAC-SPP modeli önermiştir (Men ve ark., 2018). Bu yaklaşım, rektal görüntülerdeki çok ölçekli özellikleri etkili şekilde yakalamak için kademeli genişletilmiş konvolüsyonları ve uzamsal piramit havuzlama modüllerini içermekte ve modelin özellikle rektal tümörleri çevreleyen bağlamsal bilgilere odaklanmasını sağlamaktadır.

DeSilvio ve arkadaşları, RC tedavisinden sonra T2WI görüntülerinde rektal dış duvar, lümen ve perirektal yağ alanını segmente etmek için özel olarak tasarlanmış bir U-Net modeli geliştirmiştir (DeSilvio ve ark., 2023). Çok kurumlu bir değerlendirmede, bu bölgeye özgü U-Net, bağırsak duvarı segmentasyonu için 0,920 ve bağırsak lümeni segmentasyonu için 0,895 Dice katsayısı göstergeleriyle (radyologların sırasıyla 0,946 ve 0,873 puanlarına kıyasla) görüntü segmentasyonu görevlerinde birden fazla radyologla karşılaştırılabilir performans elde etmiştir. Ayrıca, bu model performans artışı açısından diğer U-Net modellerine göre %20'lik kayda değer bir gelişme göstermiştir. Pratik önemi, tümör kapsamının doğru bir şekilde değerlendirilmesinde ve rektal yapıların hassas bir şekilde tanımlanmasında yatmaktadır.

Geleneksel U-Net ağlarının çıkarılan üst düzey özelliklerden yeterli kontur bilgisini yakalama kabiliyetinin sınırlı olması nedeniyle, Dou ve arkadaşları tarafından yakın zamanda yapılan bir çalışmada görüntü segmentasyon doğruluğunu artırmak için bir dikkat füzyonu U-Net modeli önerilmiştir (Dou ve ark., 2023). Bu model, çok parametrelili MR görüntülerini girdi olarak alır ve gömülü dikkat füzyon modülleri aracılığıyla özelliklerini etkili bir şekilde bütünleştirir. Deneysel sonuçlar, bu yaklaşımın segmentasyon için $0,821 \pm 0,065$ 'lik bir Dice katsayısı indeksi elde ettiğini ve RC görüntü segmentasyonu için şu anda mevcut olan en gelişmiş yöntemler arasında yer aldığını göstermektedir.

Huang ve arkadaşları, ROI segmentasyonu elde etmek için ROI lokalizasyon modülünü kodlayıcı olarak ve piramit tabanlı yapıyı kod çözücü olarak kullanan 3D RoI farkındalı UNet önermiştir (Y.-J. Huang ve ark., 2018). Kayan pencere veya ortak olmayan lokalizasyon-segmentasyon tabanlı modellerden farklı olarak, iki görevin bir omurga kodlayıcı ağını paylaştığı ROI lokalizasyonu ve

bölge içi segmentasyon için 3D ROI farkındalı U-Net (3D RU-Net) olarak adlandırılan yeni bir çoklu görev çerçevesi öneriyoruz.

Zhang ve arkadaşları tarafından önerilen Dual Parallel Net (DuPNet) (H. Zhang ve ark., 2023) adlı ağ, hem küresel de yerel bilgileri yakalamak için transformatör ve klasik CNN'i birleştirmektedir. Farklı ölçeklerdeki özellikleri yakalamanın yanı sıra doğruluk kaybını ve parametrelerin azaltılmasını önlemek için, kodlayıcı ve kod çözücü arasındaki atlama bağlantısında bir özellik uyarlamalı blok (FAB) tasarlarlar. Ayrıca, rektal tümör şeklinin apriori bilgisini etkili bir şekilde kullanmak için bir Gauss Karışımı önceliği tasarlarlar ve bunu dönüştürücünün kendi kendine dikkat mekanizmasına gömüyorlar, bu da sağlam özellik temsili ve doğru segmentasyon sonuçları sağlar.

Huang ve arkadaşları, ROI segmentasyonu elde etmek için kodlayıcı olarak ROI lokalizasyon modülünü ve kod çözücü olarak piramit tabanlı yapıyı kullanarak 3D ROI farkındalı UNet önermiştir (Huang ve ark., 2018). Li ve arkadaşları, kontur tahmini gelişmiş UNet'i geliştirmiş, aynı zamanda kodlayıcı ve kod çözücüye Sıkıştırma ve Uyarma (SE) modülünü ekleyerek segmentasyon doğruluğunu artırmıştır (D. Li ve ark., 2022). Jha ve arkadaşları (2021), lezyon bölgesi segmentasyonu için ResUNet++ mimarisine Koşullu Rastgele Alan (CRF) ve Test Süresi Artırımı (TTA) eklemiş ve daha iyi segmentasyon sonuçları elde etmiştir (Jha ve ark., 2021). Bunun ötesinde, Zhang ve arkadaşları VNet tabanlı bir yapı sunmuş, rektal tümör ve sınırı sırasıyla kaba taneli ve ince taneli segmentasyon gerçekleştirilmiştir (G. Zhang ve ark., 2021). Zhang ve ark. rektal kanser görüntülerini sınıflandırmak için MobileNetV2 mimarisini modifiye etmiştir (W. Zhang ve ark., 2021b). Chen ve arkadaşları DCNN ağını modifiye etmiş ve endoskopik görüntülerden canlı kanser hücresi içermeyen tümör veya kanser hücresi içeren tümör olarak tanımlamak için ResNeSt-50 adlı bir ağ önermiştir (X. Chen ve ark., 2022).

Sonuç olarak, radyomik özellik çıkarımı ve segmentasyon yöntemleri, rektal kanser tanısında tümörlerin otomatik olarak analiz edilmesini sağlayarak hem klinisyenlerin iş yükünü azaltmakta hem de model doğruluğunu artırmaktadır. Gelecekteki çalışmalar, daha hassas segmentasyon algoritmalarının geliştirilmesi ve farklı veri kümeleriyle test edilerek genelleme yeteneğinin artırılması üzerine odaklanmalıdır.

5. Vaka Analizi

Bu çalışmada kullanılan veri seti, rektal kanser teşhisinde ve segmentasyonunda kullanılmak üzere, rektal kanserli hastalara ait Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRI) kesitlerinden oluşmaktadır. Veri seti, rektal kanserin tespit ve segmentasyonu için gereken detaylı anatomik bilgileri içermekte ve projenin hedeflerine uygun bir altyapı sağlamaktadır. Bu tür veriler, hastalık tespiti ve tedavi planlamasında kritik öneme sahip olduğundan, projede

yüksek kalite ve güvenilirlik standartlarına uygun bir veri seti kullanılmıştır [TCIA].

Ham tıbbi görüntülerin yapısal ve görsel özelliklerindeki farklılıklar, modelin doğru sonuçlar üretebilmesi için bir dizi ön işleme adımı uygulanmasını gerektirir. Bu projede kullanılan ön işleme teknikleri şunlardır: MRI görüntülerindeki rastgele gürültülerin giderilmesi için filtreleme teknikleri uygulanarak, modelin görüntülerdeki gerçek özellikleri daha iyi öğrenmesini sağlar ve yanlış sonuçların önüne geçilir. Düşük kontrastlı bölgelerdeki detayların daha görünür hale getirilmesi amacıyla kontrast artırma teknikleri kullanılarak, özellikle rektal tümörlerin çevre dokulardan daha net ayrıştırılması sağlanır. Görüntülerin piksel değerlerinin belirli bir aralıkta normalize edilmesi, modelin tüm veri setindeki farklı parlaklık ve yoğunluk düzeylerine uyum sağlamasını kolaylaştırır. Farklı boyut ve çözünürlüklerdeki MRI görüntüleri, modelin gereksinimlerine uygun standart bir boyuta yeniden ölçeklendirilmiştir. Bu adım, modelin daha verimli çalışmasını sağlar. Hedef bölgelerin (örneğin, tümörlerin) doğru bir şekilde segmentasyonu için maskeleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sırasında, görüntülerde rektal kanserli bölgeler ve çevre dokular, eğitim için ayrı katmanlar halinde düzenlenmiştir.

Derin öğrenme modellerinin genelleme kapasitesini artırmak için veri artırma teknikleri kullanılmıştır. Veri artırma, sınırlı veri setlerinden daha fazla çeşitlilik elde etmek ve modelin farklı senaryolara uyum sağlamasını sağlamak için kritik bir adımdır. Bu projede uygulanan veri artırma teknikleri şunlardır: dönme (Rotation), yatay ve dikey çevirme (horizontal/vertical flip), parlaklık ve kontrast ayarı, gürültü eklenmesi, rastgele kırpmaya ve ölçekleme (random cropping/scaling).

Bu araştırmada, rektal kanser segmentasyonu için özel olarak U-Net mimarisi kullanılmıştır. Modelin mimari tasarımı, tıbbi görüntü segmentasyonu görevlerinde üstün performans göstermesiyle tanınan U-Net'in temel prensiplerine dayanır. Modelin eğitimi sırasında, veri setinin özelliklerine uygun olarak seçilen kayıp fonksiyonu, optimizasyon algoritması ve hiper parametreler, segmentasyon görevinde yüksek doğruluk elde etmek için dikkatlice ayarlanmıştır. Ayrıca, veri artırma yöntemleri kullanılarak, modelin genelleme kapasitesi artırılmıştır.

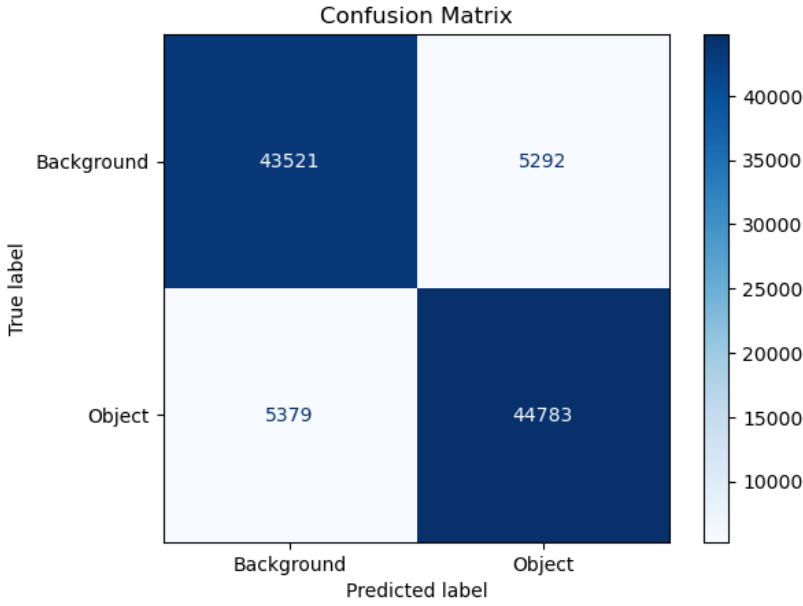
Araştırma kapsamında kullanılan U-Net modeli, encoder-decoder yapısına sahip klasik bir mimaridir: Encoder kısmı, giriş görüntüsündeki özellikleri öğrenmek için konvolüsyon katmanlarını ve maksimum havuzlama (max-pooling) işlemlerini kullanır. Bu aşamada, görüntünün boyutları küçültülür ve önemli özellikler daha kompakt bir temsile dönüştürülür. Çok katmanlı yapısı sayesinde, görüntüdeki hem düşük hem de yüksek seviyeli özellikler yakalanır. Decoder kısmı, encoder tarafından çıkarılan özellikleri kullanarak, görüntüdeki hedef bölgelerin (örneğin, tümörlerin) sınırlarını belirler. Decoder, transpoze

konvolüsyon (transpose convolution) veya yukarı örnekleme (upsampling) + konvolüsyon kombinasyonlarını kullanır. Ayrıca, encoder'dan gelen özellik haritaları, decoder'a atlama bağlantıları (skip connections) aracılığıyla aktarılır, böylece segmentasyon doğruluğu artırılır. Encoder ve decoder arasındaki bu bağlantılar, düşük seviyeli özelliklerin yüksek seviyeli özelliklerle birleştirilmesini sağlar. Bu mekanizma, detay kaybını önler ve modelin daha hassas segmentasyon yapmasına olanak tanır. Modelin ağırlıklarının güncellenmesi için optimizasyon algoritması olarak Adam (Adaptive Moment Estimation) kullanılmıştır. Adam, öğrenme sürecini hızlandıran ve stabilize eden adaptif bir algoritmadır. Projede kullanılan temel parametreler şunlardır: Öğrenme Hızı (Learning Rate) $1e-4$ olarak seçilmiştir. Bu, modelin ağırlıklarının yavaş ve istikrarlı bir şekilde güncellenmesini sağlar. Momentum ve Moment Parametreleri olarak Adam, varsayılan ayarlarıyla ($\beta_1 = 0.9$, $\beta_2 = 0.999$) uygulanmıştır. Modelin eğitimi sırasında, epoch sayısı ve batch size, deneme-yanılma yöntemleriyle ve veri setinin boyutu dikkate alınarak belirlenmiştir. Epoch Sayısı 50 ila 100 arasında seçilmiştir. Daha yüksek epoch sayıları, modelin veriyi daha iyi öğrenmesine olanak tanırken, aşırı öğrenmeyi önlemek için erken durdurma (early stopping) gibi yöntemler kullanılmıştır. Batch Size 8 olarak ayarlanmıştır. Bu değer, hem bellek kullanımı hem de modelin eğitimi sırasında performans açısından optimize edilmiştir.

Model eğitimi sürecinde kullanılan U-Net mimarisi, kayıp fonksiyonu, optimizasyon algoritması, hiperparametreler ve veri artırma teknikleri, modelin rektal kanser segmentasyonu görevinde yüksek doğruluk ve hassasiyetle çalışmasını sağlamıştır. Bu sistematik yaklaşım, yalnızca modelin performansını artırmakla kalmamış, aynı zamanda gerçek dünyada uygulanabilir bir segmentasyon çözümü geliştirilmesine de olanak tanımıştır. Modelin eğitim aşamasında elde edilen sonuçlar, segmentasyon doğruluğunu artırmak ve klinik kullanıma uygun bir sistem geliştirmek için önemli bir temel oluşturmuştur.

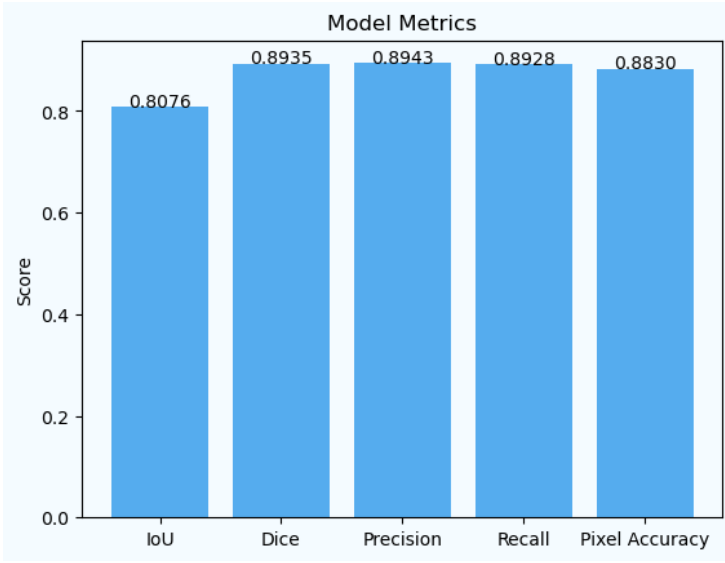
Eğitim ve doğrulama süreçlerinde başarılı sonuçlar veren modeller, test seti üzerinde de değerlendirilmiştir. Test seti, modelin genelleme kapasitesini ölçmek ve gerçek dünyadaki kullanım senaryolarını simüle etmek için ayrılmıştır. Test setinde, doğrulama setindeki metriklerle benzer sonuçlar elde edilmesi, modelin istikrarlı ve güvenilir bir şekilde çalıştığını göstermiştir.

Elde edilen sonuçlar, modelin rektal kanser segmentasyonunda yüksek doğruluk oranları sunduğunu göstermiştir: Dice Katsayısı, test seti üzerinde %90 seviyelerinde bir Dice katsayısı elde edilmiştir, bu da segmentasyon doğruluğunun oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Precision ve Recall, modelin doğru pozitifleri tespit etme kapasitesinin yüksek olduğu (Precision) ve gerçek pozitifleri eksiksiz tespit edebildiği (Recall) gözlemlenmiştir. IoU değerleri, segmentasyon maskelerinin gerçek maskelerle güçlü bir uyum gösterdiğini ortaya koymuştur.



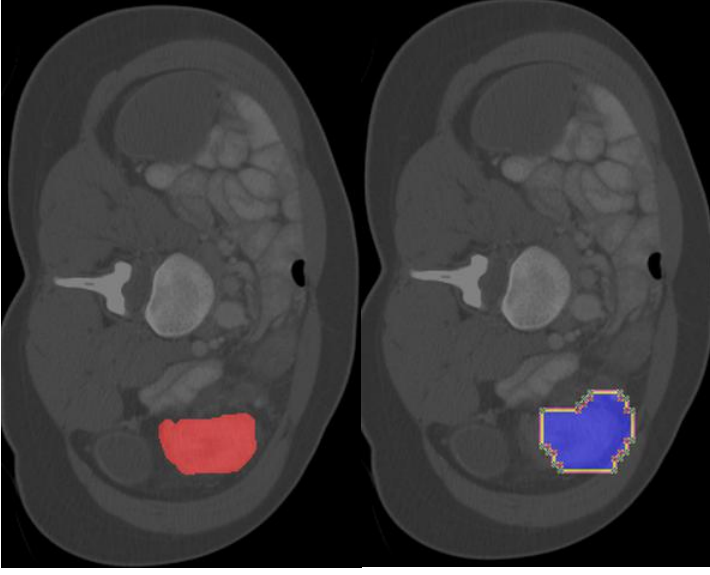
Şekil 9: Modele ait karmaşıklık matrisi

Şekil 9 ve Şekil 10’de görüldüğü gibi model performans değerlendirmesinde kullanılan metrikler rektal kanser segmentasyon görevinde yüksek doğruluk ve hassasiyet sağlandığını ortaya koymuştur. Eğitim süreci boyunca elde edilen bulgular, modelin genelleme kapasitesinin güçlü olduğunu ve klinik uygulamalar için güvenilir bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, yapay zeka tabanlı sistemlerin tıbbi görüntüleme alanında büyük bir potansiyele sahip olduğunu bir kez daha doğrulamaktadır.



Şekil 10: Modelin metrik sonuçları

Şekil 11’de görüldüğü gibi model, rektal tümörlerin konumunun ve boyutlarının tespiti konusunda yüksek doğruluk oranları yakalamış ve uzman radyologların manuel segmentasyon sonuçlarıyla büyük ölçüde örtüşen bir performans sergilemiştir. Bu durum, modelin segmentasyon işlemlerinde klinik uygulamalar için yeterli hassasiyete sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle tümörlerin çevresindeki sağlıklı dokuların korunması gereken cerrahi planlama süreçlerinde, modelin segmentasyon maskeleri uzmanların kararlarına önemli bir destek sağlamaktadır. Model, sadece tümörün sınırlarını belirlemekle kalmamış, aynı zamanda çevredeki anatomik yapıların net bir şekilde tanımlanmasına da yardımcı olmuştur.



Şekil 11: Doktorlar tarafından işaretlenen kanserli bölge (sol) ve model tarafından işaretlenen kanserli bölge (sağ)

6. Sonuçlar ve Tartışma

Makine öğrenmesi (ML) ve derin öğrenme (DL) teknikleri, rektum kanseri teşhis ve tedavisinde devrim niteliğinde gelişmeler vadetmektedir. Bu yöntemler, görüntü analizi, hasta sınıflandırması, tedavi planlaması ve prognoz tahmini gibi kritik alanlarda yapay zekânın (YZ) sunduğu olanakları genişletmektedir.

YZ'nın klinik süreçlere entegrasyonu, erken teşhis doğruluğunu artırarak, hastaların daha uygun tedavi stratejileriyle yönetilmesini sağlayabilir. Özellikle, radyomik analiz ve derin öğrenme tabanlı segmentasyon modelleri, tümörün sınırlarını ve yayılımını daha hassas bir şekilde belirleyerek, cerrahi planlamayı optimize edebilir ve daha iyi klinik sonuçlar elde edilmesine katkıda bulunabilir. Bunun yanı sıra, ML ve DL tabanlı tahmin modelleri, yüksek riskli hasta gruplarını belirleyerek, kişiselleştirilmiş tedavi yaklaşımlarının geliştirilmesini kolaylaştırmaktadır.

Bu teknolojik gelişmeler, yalnızca klinisyenlere tanı ve tedavi kararlarında destek sağlamakla kalmaz, aynı zamanda hastaların daha bilinçli sağlık kararları almasına da yardımcı olabilir. ML ve DL, hastalık sürecinin her aşamasında öngörücü modeller oluşturarak, hastaların prognozlarını daha iyi anlamalarına ve bireyselleştirilmiş sağlık yönetimi süreçlerine katkı sağlamalarına olanak tanır.

Ayrıca, yapay zekâ destekli tanı ve tedavi sistemlerinin yaygınlaşması, hastanelerde iş yükünü azaltarak tıbbi kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlayabilir. Özellikle, otomatik görüntü analizi ve raporlama sistemleri, radyologlar ve onkologlar için büyük bir zaman tasarrufu sunarak, sağlık hizmetlerinin etkinliğini artırabilir.

Klinik uygulamalarda geniş çapta benimsenme potansiyeline sahip olan YZ teknolojileri, kişiye özel tedavi seçeneklerini geliştirme ve tedavi sonuçlarını iyileştirme açısından büyük bir fırsat sunmaktadır. YZ'nin sağlık sistemine entegre edilmesiyle birlikte, daha hassas, daha hızlı ve daha güvenilir tanı ve tedavi yöntemleri geliştirilerek, rektum kanseri hastaları için daha iyi klinik sonuçlar elde edilmesi sağlanabilir. Bu nedenle, ML ve DL'nin klinik uygulamalara entegrasyonu, onkoloji alanında gelecekte büyük değişimler yaratma potansiyeline sahip yenilikçi bir yaklaşım olarak görülmektedir.

7. Rektal Kanser Tanı ve Tedavisinde Yapay Zekanın Zorlukları, Riskleri ve Geleceği

Yapay zekâ, rektum kanserinin teşhisi ve önlenmesi için büyük bir potansiyele sahip olsa da, bu alan hala erken aşamalarındadır. Birçok uygulama teoriktir, geliştirilme aşamasındadır ya da araştırma veya klinik ortamlarda mümkündür. YZ'nin bu alanda başarılı bir şekilde kullanılması, hasta bilgilerinden ve klinik bakım uygulamalarından elde edilen kapsamlı veri kümelerini gerektirir. Bununla birlikte, özellikle hassas tıbbi verilerin kullanımıyla ilgili etik ve yasal kaygılar ortaya çıkmaktadır.

YZ sistemleri, hasta parametrelerini sağlamak ve tıbbi otomasyon tarafından izlenmek için katı kurallar altında çalışmalıdır. Kanıtlanmış ve son derece güvenilir güvenlik dağıtımı ve sağlam genişletilmiş çerçeveler, YZ'nin bozulmamasını ve klinik iş akışlarında sorumlu bir şekilde sınıflandırılmasını sağlamak için gereklidir.

Rektum kanseri için yapay zeka modellerinin eğitilmesi, elektronik sağlık sistemlerinden hasta kayıtlarının MR ve BT taramaları gibi kayıtlı görüntüleme yöntemleriyle entegre edilmesini içerir. Bu entegrasyon önemli gizlilik riskleri doğurmaktadır. Klinik bilgiler değiştirilebilir ve bu da hasta mahremiyetinin genişlemesine yol açabilir. Bu nedenle, yapay zeka sistemleri rektum kanseri teşhisinde yaygın olarak kullanılmadan önce güvenli veri iletişim protokolleri ve güçlü yasal korumalar da dahil olmak üzere önlemler alınmaktadır.

Yapay zekanın rektal kanserdeki geleceği, büyük miktardaki veriler yerine yüksek kaliteli veri kümelerinin genişlemesini vurgulayan veri merkezli yapay zekaya geçişle uyumludur. Yapay zekanın rektal kanserdeki tüm potansiyeli, küresel sağlık hizmetlerinin altyapılarını çağdaşlaştırma, araştırma yönetimiyle iş birliğini teşvik etme ve anonimleştirilmiş veri kümelerini güvenli bir şekilde paylaşmayı düşünmeli. Bu, yapay zekâ modellerinin hasta gizliliğini tehlikeye atmadan yüksek kalitede, temizlenebilir verilerin üzerinde yetiştirilmesini güvence altına alır. Rektum kanserinde yapay zekâ uygulamalarının, MRI veya BT görüntülemede tümör segmentasyonu ve evreleme gibi veri açısından zengin alanlarda önemli ilerlemeler kaydetmesi beklenmektedir. Bu gelişmeler, rektum kanseri teşhisi, evrelemesi ve tedavi planlaması için kritik bir araç olan çok parametrelili MRG'yi analiz etme yeteneğini geliştirecektir. Tedavi yanıtını veya

nüksü tahmin etmek gibi daha karmaşık sorunlar daha fazla zaman ve rafine yapay zekâ yaklaşımları gerektirse de ufukta ilerleme var.

Görüntüleme verilerinin hızlı bir şekilde işlenmesi, yapay zeka tarafından üretilen içgörülerle birleştğinde radyologların ve onkologların daha doğru ve zamanında kararlar almasını sağlayacaktır. Bu da gelişmiş hasta yönetimine, gerçek zamanlı tedavi ayarlamalarına ve potansiyel olarak hayat kurtarıcı müdahalelere yol açabilir. Genel olarak, YZ rektum kanseri bakımını dönüştürmede, hem tanıyı hem de sonuçları iyileştirmede umut verici bir geleceğe sahiptir.

REFERANSLAR

- Abbaspour, E., Karimzadagh, S., Monsef, A., Joukar, F., Mansour-Ghanaei, F., & Hassanipour, S. (2024). Application of radiomics for preoperative prediction of lymph node metastasis in colorectal cancer: a systematic review and meta-analysis. *International Journal of Surgery (London, England)*, 110(6), 3795–3813. <https://doi.org/10.1097/JS9.0000000000001239>
- Advancing Medical Image Registration and Tumor Segmentation with Deep Learning: Design, Implementation, and Transfer into Clinical Application - ProQuest.* (n.d.). Retrieved December 13, 2024, from <https://www.proquest.com/docview/3087833972?sourcetype=Dissertations%20&%20Theses>
- Badrinarayanan, V., Kendall, A., & Cipolla, R. (2017). SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 39(12). <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2016.2644615>
- Cai, L., Lambregts, D. M. J., Beets, G. L., Mass, M., Pooch, E. H. P., Guérendel, C., Beets-Tan, R. G. H., & Benson, S. (2024). An automated deep learning pipeline for EMVI classification and response prediction of rectal cancer using baseline MRI: a multi-centre study. *Npj Precision Oncology* 2024 8:1, 8(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41698-024-00516-x>
- Cai, Z., Xu, Z., Chen, Y., Zhang, R., Guo, B., Chen, H., Ouyang, F., Chen, X., Chen, X., Liu, D., Luo, C., Li, X., Liu, W., Zhou, C., Guan, X., Liu, Z., Zhao, H., & Hu, Q. (2024). Multiparametric MRI subregion radiomics for preoperative assessment of high-risk subregions in microsatellite instability of rectal cancer patients: A multicenter study. *International Journal of Surgery*. <https://doi.org/10.1097/js9.0000000000001335>
- Chen, L., Zhu, W., Zhang, W., Chen, E., & Zhou, W. (2024). Magnetic resonance imaging radiomics-based prediction of severe inflammatory response in locally advanced rectal cancer patients after neoadjuvant radiochemotherapy. *Langenbeck's Archives of Surgery*, 409(1). <https://doi.org/10.1007/s00423-024-03416-7>
- Chen, X., Chen, J., He, X., Xu, L., Liu, W., Lin, D., Luo, Y., Feng, Y., Lian, L., Hu, J., & Lan, P. (2022). Endoscopy-Based Deep Convolutional Neural Network Predicts Response to Neoadjuvant Treatment for Locally Advanced Rectal Cancer. *Frontiers in Physiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.880981>
- Chollet, F. (2016). Xception: Deep Learning with Depthwise Separable Convolutions. *Proceedings - 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2017, 2017-January*, 1800–1807. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.195>

- Deasy, J. O., Blanco, A. I., & Clark, V. H. (2003). CERR: A computational environment for radiotherapy research. *Medical Physics*, 30(5), 979–985. <https://doi.org/10.1118/1.1568978>
- Deng, B., Wang, Q., Liu, Y., Yang, Y., Gao, X., & Dai, H. (2024). A nomogram based on MRI radiomics features of mesorectal fat for diagnosing T2- and T3-stage rectal cancer. *Abdominal Radiology*, 49(6), 1850–1860. <https://doi.org/10.1007/S00261-023-04164-W/METRICS>
- Deng, J., Dong, W., Socher, R., Li, L. J., Li, K., & Fei-Fei, L. (2009). ImageNet: A Large-Scale Hierarchical Image Database. *2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2009*. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2009.5206848>
- DeSilvio, T., Antunes, J. T., Bera, K., Chirra, P., Le, H., Liska, D., Stein, S. L., Marderstein, E., Hall, W., Paspulati, R., Gollamudi, J., Puryrsko, A. S., & Viswanath, S. E. (2023). Region-specific deep learning models for accurate segmentation of rectal structures on post-chemoradiation T2w MRI: a multi-institutional, multi-reader study. *Frontiers in Medicine*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmed.2023.1149056>
- Dou, M., Chen, Z., Tang, Y., Sheng, L., Zhou, J., Wang, X., & Yao, Y. (2023). Segmentation of rectal tumor from multi-parametric MRI images using an attention-based fusion network. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 61(9). <https://doi.org/10.1007/s11517-023-02828-9>
- Fedorov A., Beichel R., Kalpathy-Cramer J., Finet J., Fillion-Robin J-C., Pujol S., Bauer C., Jennings D., Fennessy F.M., Sonka M., Buatti J., Aylward S.R., Miller J.V., Pieper S., Kikinis R. 3D Slicer as an Image Computing Platform for the Quantitative Imaging Network. Magnetic Resonance Imaging. 2012 Nov;30(9):1323-41. PMID: 22770690. PMCID: PMC3466397.**
- Gao, Y., Lu, Y., Li, S., Dai, Y., Feng, B., Han, F. H., Han, J. G., He, J. J., Li, X. X., Lin, G. Le, Liu, Q., Wang, G. Y., Wang, Q., Wang, Z. N., Wang, Z., Wu, A. W., Wu, B., Yang, Y. C., Yao, H. W., ... Zhang, Z. T. (2021). Chinese guideline for the application of rectal cancer staging recognition systems based on artificial intelligence platforms (2021 edition). *Chinese Medical Journal*, 134(11). <https://doi.org/10.1097/CM9.0000000000001483>
- Glynne-Jones, R., Wyrwicz, L., Tiet, E., Brown, G., Rödel, C., Cervantes, A., & Arnold, D. (2017). Rectal cancer: ESMO Clinical Practice Guidelines for diagnosis, treatment and follow-up. *Annals of Oncology*, 28. <https://doi.org/10.1093/annonc/mdx224>
- Haak, H. E., Gao, X., Maas, M., Waktola, S., Benson, S., Beets-Tan, R. G. H., Beets, G. L., van Leerdam, M., & Melenhorst, J. (2022a). The use of deep learning on endoscopic images to assess the response of rectal cancer after

- chemoradiation. *Surgical Endoscopy*, 36(5), 3592–3600.
<https://doi.org/10.1007/S00464-021-08685-7>
- Haak, H. E., Gao, X., Maas, M., Waktola, S., Benson, S., Beets-Tan, R. G. H., Beets, G. L., van Leerdam, M., & Melenhorst, J. (2022b). The use of deep learning on endoscopic images to assess the response of rectal cancer after chemoradiation. *Surgical Endoscopy*, 36(5), 3592–3600.
<https://doi.org/10.1007/s00464-021-08685-7>
- Haak, H. E., Maas, M., Trebeschi, S., & Beets-Tan, R. G. H. (2020). Modern MR Imaging Technology in Rectal Cancer; There Is More Than Meets the Eye. In *Frontiers in Oncology* (Vol. 10). Frontiers Media S.A.
<https://doi.org/10.3389/fonc.2020.537532>
- Hara, K., Kataoka, H., & Satoh, Y. (2017). Can Spatiotemporal 3D CNNs Retrace the History of 2D CNNs and ImageNet? *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 6546–6555. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00685>
- Haralick, R. M., Shanmugam, K., & Dinstein, I. (1973). Textural_Features_For_Image_Classification. *Ieee Transactions On Systems, Man, And Cybernetics*, 3(6).
- Haskins, G., Kruger, U., & Yan, P. (2020). Deep learning in medical image registration: a survey. *Machine Vision and Applications*, 31(1), 8.
- He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2015). Deep Residual Learning for Image Recognition. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016-December*, 770–778.
<https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90>
- He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016-December*.
<https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90>
- Hinton, G. E., Osindero, S., & Teh, Y. W. (2006). A fast learning algorithm for deep belief nets. *Neural computation*, 18(7), 1527–1554.
- Hornbrook, M. C., Goshen, R., Choman, E., O’Keeffe-Rosetti, M., Kinar, Y., Liles, E. G., & Rust, K. C. (2017). Early Colorectal Cancer Detected by Machine Learning Model Using Gender, Age, and Complete Blood Count Data. *Digestive Diseases and Sciences*, 62(10), 2719–2727.
<https://doi.org/10.1007/S10620-017-4722-8>
- Howard, A. G., Zhu, M., Chen, B., Kalenichenko, D., Wang, W., Weyand, T., Andreetto, M., & Adam, H. (2017). *MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications*.
<https://arxiv.org/abs/1704.04861v1>

- Hu, T. D., Gong, J., Sun, Y. Q., Li, M. L., Cai, C. P., Li, X. X., Cui, Y. F., Zhang, X. Y., & Tong, T. (2024). Magnetic resonance imaging-based radiomics analysis for prediction of treatment response to neoadjuvant chemoradiotherapy and clinical outcome in patients with locally advanced rectal cancer: A large multicentric and validated study. *MedComm*, 5(7). <https://doi.org/10.1002/mco2.609>
- Huang, G., Liu, Z., Van Der Maaten, L., & Weinberger, K. Q. (2016). Densely Connected Convolutional Networks. *Proceedings - 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2017, 2017-January*, 2261–2269. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.243>
- Huang, Y.-J., Dou, Q., Wang, Z.-X., Liu, L.-Z., Jin, Y., Li, C.-F., Wang, L., Chen, H., & Xu, R.-H. (2018). 3D RoI-aware U-Net for Accurate and Efficient Colorectal Tumor Segmentation. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2020.2980145>
- Ibrahim, N., Pratiwi, N. K. C., Pramudito, M. A., & Taliningsih, F. F. (2021). Non-Complex CNN Models for Colorectal Cancer (CRC) Classification Based on Histological Images. *Lecture Notes in Electrical Engineering, 746 LNEE*. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6926-9_44
- Irving, B., Franklin, J. M., Papiez, B. W., Anderson, E. M., Sharma, R. A., Gleeson, F. V., Brady, S. M., & Schnabel, J. A. (2016). Pieces-of-parts for supervoxel segmentation with global context: Application to DCE-MRI tumour delineation. *Medical Image Analysis*, 32, 69–83. <https://doi.org/10.1016/j.media.2016.03.002>
- Isensee, F., Jaeger, P. F., Kohl, S. A. A., Petersen, J., & Maier-Hein, K. H. (2020). nnU-Net: a self-configuring method for deep learning-based biomedical image segmentation. *Nature Methods* 2020 18:2, 18(2), 203–211. <https://doi.org/10.1038/s41592-020-01008-z>
- Jayaprakasam, V. S., Paroder, V., Gibbs, P., Bajwa, R., Gangai, N., Sosa, R. E., Petkovska, I., Golia Pernicka, J. S., Fuqua, J. L., Bates, D. D. B., Weiser, M. R., Cercek, A., & Gollub, M. J. (2022). MRI radiomics features of mesorectal fat can predict response to neoadjuvant chemoradiation therapy and tumor recurrence in patients with locally advanced rectal cancer. *European Radiology*, 32(2). <https://doi.org/10.1007/s00330-021-08144-w>
- Jha, D., Smedsrud, P. H., Johansen, D., De Lange, T., Johansen, H. D., Halvorsen, P., & Riegler, M. A. (2021). A Comprehensive Study on Colorectal Polyp Segmentation with ResUNet++, Conditional Random Field and Test-Time Augmentation. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 25(6), 2029–2040. <https://doi.org/10.1109/JBHI.2021.3049304>
- Jian, J., Xiong, F., Xia, W., Zhang, R., Gu, J., Wu, X., Meng, X., & Gao, X. (2018). Fully convolutional networks (FCNs)-based segmentation method for colorectal tumors on T2-weighted magnetic resonance images. *Australasian*

- Jiang, X., Zhao, H., Saldanha, O. L., Nebelung, S., Kuhl, C., Amygdalos, I., Lang, S. A., Wu, X., Meng, X., Truhn, D., Kather, J. N., & Ke, J. (2023). An MRI Deep Learning Model Predicts Outcome in Rectal Cancer. *Radiology*, 307(5).
<https://doi.org/10.1148/RADIOL.222223/ASSET/IMAGES/LARGE/RADIOL.222223.FIG6.JPEG>
- Kim, J., Oh, J. E., Lee, J., Kim, M. J., Hur, B. Y., Sohn, D. K., & Lee, B. (2019). Rectal cancer: Toward fully automatic discrimination of T2 and T3 rectal cancers using deep convolutional neural network. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 29(3). <https://doi.org/10.1002/ima.22311>
- Leonard, G., South, C., Balentine, C., Porembka, M., Mansour, J., Wang, S., Yopp, A., Polanco, P., Zeh, H., & Augustine, M. (2022). Machine Learning Improves Prediction Over Logistic Regression on Resected Colon Cancer Patients. *Journal of Surgical Research*, 275, 181–193.
<https://doi.org/10.1016/J.JSS.2022.01.012>
- Li, D., Chu, X., Cui, Y., Zhao, J., Zhang, K., & Yang, X. (2022). Improved U-Net based on contour prediction for efficient segmentation of rectal cancer. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 213.
<https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2021.106493>
- Li, H., Lin, J., Xiao, Y., Zheng, W., Zhao, L., Yang, X., Zhong, M., & Liu, H. (2021). Colorectal Cancer Detected by Machine Learning Models Using Conventional Laboratory Test Data. *Technology in Cancer Research & Treatment*, 20. <https://doi.org/10.1177/15330338211058352>
- Liang, Y., Wei, Y., Xu, F., & Wei, X. (2024). MRI-based radiomic models for the preoperative prediction of extramural venous invasion in rectal cancer: A systematic review and meta-analysis. *Clinical Imaging*, 110.
<https://doi.org/10.1016/j.clinimag.2024.110146>
- Lin, S. H., Raju, G. S., Huff, C., Ye, Y., Gu, J., Chen, J. S., Hildebrandt, M. A. T., Liang, H., Menter, D. G., Morris, J., Hawk, E., Strohlein, J. R., Futreal, A., Kopetz, S., Mishra, L., & Wu, X. (2018). The somatic mutation landscape of premalignant colorectal adenoma. *Gut*, 67(7), 1299–1305.
<https://doi.org/10.1136/GUTJNL-2016-313573>
- Liu, H., Zhang, C., Wang, L., Luo, R., Li, J., Zheng, H., Yin, Q., Zhang, Z., Duan, S., Li, X., & Wang, D. (2019). MRI radiomics analysis for predicting preoperative synchronous distant metastasis in patients with rectal cancer. *European Radiology*, 29(8). <https://doi.org/10.1007/s00330-018-5802-7>

- Liu, M., Ma, X., Shen, F., Xia, Y., Jia, Y., & Lu, J. (2020). MRI-based radiomics nomogram to predict synchronous liver metastasis in primary rectal cancer patients. *Cancer Medicine*, 9(14). <https://doi.org/10.1002/cam4.3185>
- Liu, Z., Jia, J., Bai, F., Ding, Y., Han, L., & Bai, G. (2024). Predicting rectal cancer tumor budding grading based on MRI and CT with multimodal deep transfer learning: A dual-center study. *Heliyon*, 10(7), e28769. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2024.E28769>
- Long, N. P., Park, S., Anh, N. H., Nghi, T. D., Yoon, S. J., Park, J. H., Lim, J., & Kwon, S. W. (2019). High-Throughput Omics and Statistical Learning Integration for the Discovery and Validation of Novel Diagnostic Signatures in Colorectal Cancer. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(2). <https://doi.org/10.3390/IJMS20020296>
- Ma, X., Shen, F., Jia, Y., Xia, Y., Li, Q., & Lu, J. (n.d.). *MRI-based radiomics of rectal cancer: preoperative assessment of the pathological features*. <https://doi.org/10.1186/s12880-019-0392-7>
- Men, K., Boimel, P., Janopaul-Naylor, J., Zhong, H., Huang, M., Geng, H., Cheng, C., Fan, Y., Plastaras, J. P., Ben-Josef, E., & Xiao, Y. (2018). Cascaded atrous convolution and spatial pyramid pooling for more accurate tumor target segmentation for rectal cancer radiotherapy. *Physics in Medicine and Biology*, 63(18). <https://doi.org/10.1088/1361-6560/aada6c>
- Men, K., Dai, J., & Li, Y. (2017). Automatic segmentation of the clinical target volume and organs at risk in the planning CT for rectal cancer using deep dilated convolutional neural networks: *Medical Physics*, 44(12). <https://doi.org/10.1002/mp.12602>
- Meng, Y., Ai, Q., Hu, Y., Han, H., Song, C., Yuan, G., Hou, X., & Weng, W. (2024). Clinical development of MRI-based multi-sequence multi-regional radiomics model to predict lymph node metastasis in rectal cancer. *Abdominal Radiology*, 49(6), 1805–1815. <https://doi.org/10.1007/S00261-024-04204-Z/METRICS>
- Nakajima, T., Katsumata, K., Kuwabara, H., Soya, R., Enomoto, M., Ishizaki, T., Tsuchida, A., Mori, M., Hiwatari, K., Soga, T., Tomita, M., & Sugimoto, M. (2018). Urinary Polyamine Biomarker Panels with Machine-Learning Differentiated Colorectal Cancers, Benign Disease, and Healthy Controls. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(3). <https://doi.org/10.3390/IJMS19030756>
- Shafiq, M., & Gu, Z. (2022). Deep Residual Learning for Image Recognition: A Survey. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 12, Issue 18). <https://doi.org/10.3390/app12188972>
- Shen, W.-C., Chen, S.-W., Wu, K.-C., Lee, P.-Y., Feng, C.-L., Hsieh, T.-C., Yen, K.-Y., & Kao, C.-H. (2020). Predicting pathological complete response in rectal

- cancer after chemoradiotherapy with a random forest using 18F-fluorodeoxyglucose positron emission tomography and computed tomography radiomics. *Annals of Translational Medicine*, 8(5), 207–207. <https://doi.org/10.21037/ATM.2020.01.107>
- Shin, H. C., Roth, H. R., Gao, M., Lu, L., Xu, Z., Nogues, I., Yao, J., Mollura, D., & Summers, R. M. (2016). Deep Convolutional Neural Networks for Computer-Aided Detection: CNN Architectures, Dataset Characteristics and Transfer Learning. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 35(5). <https://doi.org/10.1109/TMI.2016.2528162>
- Shin, J., Seo, N., Baek, S. E., Son, N. H., Lim, J. S., Kim, N. K., Koom, W. S., & Kim, S. (2022). MRI Radiomics Model Predicts Pathologic Complete Response of Rectal Cancer Following Chemoradiotherapy. *Radiology*, 303(2). <https://doi.org/10.1148/RADIOL.211986>
- Sun, C., & Wee, W. G. (1983). Neighboring gray level dependence matrix for texture classification. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 23(3). [https://doi.org/10.1016/0734-189X\(83\)90032-4](https://doi.org/10.1016/0734-189X(83)90032-4)
- Szegedy, C., Ioffe, S., Vanhoucke, V., & Alemi, A. A. (2016). Inception-v4, Inception-ResNet and the Impact of Residual Connections on Learning. *31st AAAI Conference on Artificial Intelligence, AAAI 2017*, 4278–4284. <https://doi.org/10.1609/aaai.v31i1.11231>
- Szegedy, C., Vanhoucke, V., Ioffe, S., Shlens, J., & Wojna, Z. (2015a). Rethinking the Inception Architecture for Computer Vision. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016-December*, 2818–2826. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.308>
- Szegedy, C., Vanhoucke, V., Ioffe, S., Shlens, J., & Wojna, Z. (2015b). Rethinking the Inception Architecture for Computer Vision. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016-December*, 2818–2826. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.308>
- Tan, M., & Le, Q. V. (2019). EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks. *36th International Conference on Machine Learning, ICML 2019, 2019-June*, 10691–10700. <https://arxiv.org/abs/1905.11946v5>
- The Cancer Imaging Archive (TCIA). (2023). *Rectal MRI dataset for segmentation studies* [Data set]. Retrieved November 12, 2025, from <https://www.cancerimagingarchive.net/>
- Tibshirani, R. (1996). Regression Shrinkage and Selection via the Lasso. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 58(1), 267–288.
- Trebeschi, S., Van Griethuysen, J. J. M., Lambregts, D. M. J., Lahaye, M. J., Parmer, C., Bakers, F. C. H., Peters, N. H. G. M., Beets-Tan, R. G. H., & Aerts, H. J. W. L. (2017). Deep Learning for Fully-Automated Localization and

Segmentation of Rectal Cancer on Multiparametric MR. *Scientific Reports*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05728-9>

van Griethuysen, J. J. M., Fedorov, A., Parmar, C., Hosny, A., Aucoin, N., Narayan, V., Beets-Tan, R. G. H., Fillon-Robin, J. C., Pieper, S., Aerts, H. J. W. L. (2017). Computational Radiomics System to Decode the Radiographic Phenotype. *Cancer Research*, 77(21), e104–e107. <https://doi.org/10.1158/0008-5472.CAN-17-0339> <<https://doi.org/10.1158/0008-5472.CAN-17-0339>>`_

Wang, Y., Zhang, L., Jiang, Y., Cheng, X., He, W., Yu, H., Li, X., Yang, J., Yao, G., Lu, Z., Zhang, Y., Yan, S., & Zhao, F. (2024). Multiparametric magnetic resonance imaging (MRI)-based radiomics model explained by the Shapley Additive exPlanations (SHAP) method for predicting complete response to neoadjuvant chemoradiotherapy in locally advanced rectal cancer: a multicenter retrospective study. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, 14(7), 4617–4634. <https://doi.org/10.21037/qims-24-7>

Wei, Q., Chen, L., Hou, X., Lin, Y., Xie, R., Yu, X., Zhang, H., Wen, Z., Wu, Y., Liu, X., & Chen, W. (2024). Multiparametric MRI-based radiomic model for predicting lymph node metastasis after neoadjuvant chemoradiotherapy in locally advanced rectal cancer. *Insights into Imaging*, 15(1). <https://doi.org/10.1186/s13244-024-01726-4>

Wong, C., Fu, Y., Li, M., Mu, S., Chu, X., Fu, J., Lin, C., & Zhang, H. (2023). MRI-Based Artificial Intelligence in Rectal Cancer. In *Journal of Magnetic Resonance Imaging* (Vol. 57, Issue 1, pp. 45–56). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/jmri.28381>

Xu, Y., Guo, J., Yang, N., Zhu, C., Zheng, T., Zhao, W., Liu, J., & Song, J. (2024). Predicting rectal cancer prognosis from histopathological images and clinical information using multi-modal deep learning. *Frontiers in Oncology*, 14, 1353446. <https://doi.org/10.3389/FONC.2024.1353446>

Yin, J., Song, L., Lu, H., of, X. Z.-W. J., & 2020, undefined. (n.d.). Prediction of different stages of rectal cancer: Texture analysis based on diffusion-weighted images and apparent diffusion coefficient maps. *Ncbi.Nlm.Nih.GovJD Yin, LR Song, HC Lu, X ZhengWorld Journal of Gastroenterology*, 2020•ncbi.Nlm.Nih.Gov. Retrieved July 30, 2024, from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7267694/>

Yu, H., Yang, L. T., Zhang, Q., Armstrong, D., & Deen, M. J. (2021). Convolutional neural networks for medical image analysis: State-of-the-art, comparisons, improvement and perspectives. *Neurocomputing*, 444. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.04.157>

Yu, N., Wan, Y., Zuo, L., Cao, Y., Qu, D., Liu, W., Deng, L., Zhang, T., Wang, W., Wang, J., Lv, J., Xiao, Z., Feng, Q., Zhou, Z., Bi, N., Niu, T., & Wang, X. (2024). Multi-modal Radiomics Features to Predict Overall Survival of

Locally Advanced Esophageal Cancer after Definitive Chemoradiotherapy.
<https://doi.org/10.21203/RS.3.RS-4338589/V1>

- Zhang, G., Chen, L., Liu, A., Pan, X., Shu, J., Han, Y., Huan, Y., & Zhang, J. (2021). Comparable Performance of Deep Learning–Based to Manual–Based Tumor Segmentation in KRAS/NRAS/BRAF Mutation Prediction With MR–Based Radiomics in Rectal Cancer. *Frontiers in Oncology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fonc.2021.696706>
- Zhang, H., Yang, X., Li, D., Cui, Y., Zhao, J., & Qiu, S. (2023). Dual parallel net: A novel deep learning model for rectal tumor segmentation via CNN and transformer with Gaussian Mixture prior. *Journal of Biomedical Informatics*, 139. <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2023.104304>
- Zhang, W., Yin, H., Huang, Z., Zhao, J., Zheng, H., He, D., Li, M., Tan, W., Tian, S., & Song, B. (2021a). Development and validation of MRI-based deep learning models for prediction of microsatellite instability in rectal cancer. *Cancer Medicine*, 10(12), 4164–4173. <https://doi.org/10.1002/CAM4.3957>
- Zhang, W., Yin, H., Huang, Z., Zhao, J., Zheng, H., He, D., Li, M., Tan, W., Tian, S., & Song, B. (2021b). Development and validation of MRI-based deep learning models for prediction of microsatellite instability in rectal cancer. *Cancer Medicine*, 10(12). <https://doi.org/10.1002/cam4.3957>
- Zhi, J., Sun, J., Wang, Z., & Ding, W. (2018). Support vector machine classifier for prediction of the metastasis of colorectal cancer. *International Journal of Molecular Medicine*, 41(3), 1419–1426. <https://doi.org/10.3892/IJMM.2018.3359>
- Zhu, H. T., Zhang, X. Y., Shi, Y. J., Li, X. T., & Sun, Y. S. (2020). A Deep Learning Model to Predict the Response to Neoadjuvant Chemoradiotherapy by the Pretreatment Apparent Diffusion Coefficient Images of Locally Advanced Rectal Cancer. *Frontiers in Oncology*, 10. <https://doi.org/10.3389/FONC.2020.574337>
- Zhu, H. T., Zhang, X. Y., Shi, Y. J., Li, X. T., & Sun, Y. S. (2021a). Automatic segmentation of rectal tumor on diffusion-weighted images by deep learning with U-Net. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 22(9), 324–331. <https://doi.org/10.1002/ACM2.13381>
- Zhu, H. T., Zhang, X. Y., Shi, Y. J., Li, X. T., & Sun, Y. S. (2021b). Automatic segmentation of rectal tumor on diffusion-weighted images by deep learning with U-Net. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 22(9), 324–331. <https://doi.org/10.1002/acm2.13381>
- Zhu, H., Zhang, X., Li, X., Shi, Y., Zhu, H., & Sun, Y. (2019). Prediction of pathological nodal stage of locally advanced rectal cancer by collective features of multiple lymph nodes in magnetic resonance images before and after neoadjuvant chemoradiotherapy. *Chinese Journal of Cancer Research*

= Chung-Kuo Yen Cheng Yen Chiu, 31(6), 984–992.
<https://doi.org/10.21147/J.ISSN.1000-9604.2019.06.14>

Zhu, W., Xu, Y., Zhu, H., Qiu, B., Zhan, M., & wang, H. (2024). Multi-parametric MRI radiomics for predicting response to neoadjuvant therapy in patients with locally advanced rectal cancer. *Japanese Journal of Radiology*.
<https://doi.org/10.1007/s11604-024-01630-3>

Zhuang, Z., Zhang, Y., Yang, X., Deng, X., & Wang, Z. (2024). T2WI-based texture analysis predicts preoperative lymph node metastasis of rectal cancer. *Abdominal Radiology*, 49(6), 2008–2016. <https://doi.org/10.1007/S00261-024-04209-8/METRICS>

Zwanenburg, A., Leger, S., Vallières, M., & Löck, S. (2016). *Image biomarker standardisation initiative*. <https://doi.org/10.1148/radiol.2020191145>

BÖLÜM 9

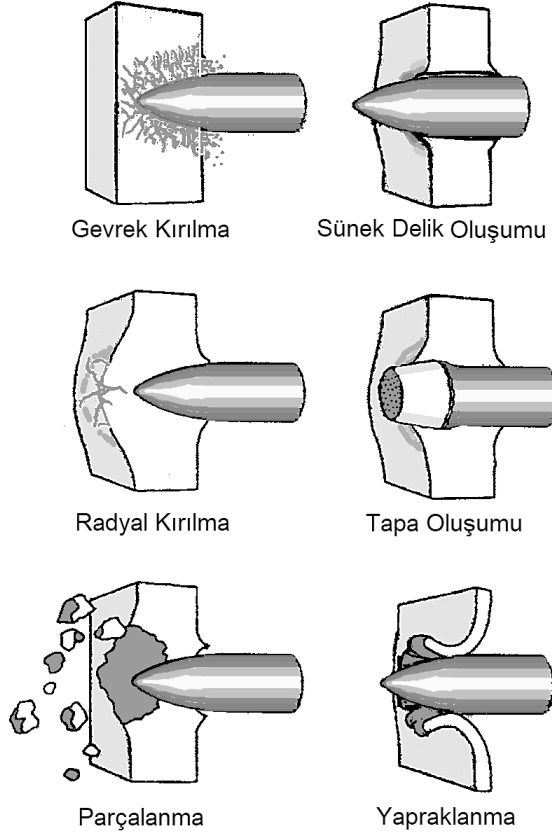
Süpersonik Hızlı Mermilerin Zırhlarda Yarattığı Balistik Hasar Etkilerinin İncelenmesinde Kullanılan Nümerik ve DeneySEL Yöntemler

Mehmet Çalışkan¹

¹ Prof. Dr., Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID ID: 0000-0002-7835-9414

1. Giriş

Süpersonik hızdaki mermiler (yaklaşık > 340 m/s), zırh malzemeleri üzerinde karmaşık bir hasar mekanizması oluşturur [1] (Şekil1): plastik deformasyon, adyabatik kesme bantları, kırılma, delik genişlemesi, parçalanma (spalling) ve arka yüz çıkıntısı (back-face deformation). Bu nedenle hem nümerik hem de deneysel balistik inceleme yöntemleri, savunma sanayii, zırh tasarımı ve malzeme mühendisliği alanlarında kritik öneme sahiptir.



Şekil 8. Terminal balistikte hasar mekanizmaları [1].

2. Deneysel Yöntemler

2.1 Balistik Atış Testleri

Bu yöntem, gerçek mühimmatın hedef malzemeye ateşlenmesiyle yapılan klasik ve en güvenilir doğrulama yöntemidir. Şekil 2 de tipik bir atış test düzeneği görülmektedir [2].

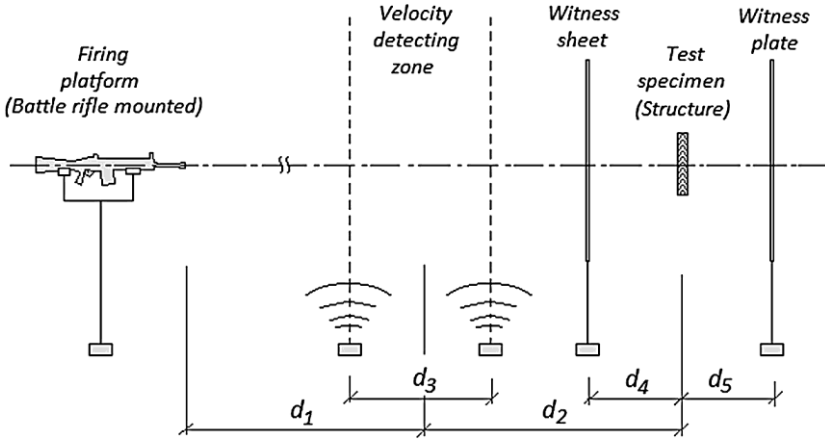
Kullanılan alt sistemler şunlardır [3], [4] ve [5]:

- Balistik tüneller / test odaları,

- Elektromanyetik veya gaz basınçlı atış sistemleri,
- Yüksek hızlı kamera sistemleri (100.000–1.000.000 fps),
- Kronograf / lazer hız ölçer (mermi çıkış ve çarpma hızları),
- Zırh konumlandırma fişstürleri.

Ölçülen parametreler:

- Delme derinliği,
- Delik çapı ve deformasyon,
- Çarpma öncesi/sonrası hız,
- Merminin parçalanma paterni,
- Zırh arka yüz deformasyonu (NIJ standartlarına göre ölçülür).



Şekil 9. Piyade tüfekleri için balistik test düzeneği [2].

2.2 Post-Mortem Hasar İncelemesi

Atış sonrası zırhın çeşitli mikroskopik ve makroskopik yöntemlerle analizi yapılır [4] ve [6]. Analizde şunlar incelenir:

- Optik ve dijital mikroskopi → çatlak ağları, adyabatik kesme bantları,
- SEM/TEM → mikroyapı, tane sınırlarında hasar,
- Metalografik kesit alma → ısı etkisi, deformasyon bölgesi,
- 3D tarama / lazer profilometre → krater geometrisi ve delme konisi.

Yöntemin avantajı, gerçek hasarı doğrulamasıdır. Dezavantajı ise tekrarlanmasının zor, maliyetli oluşu ve güvenlik gerektirmesidir.

2.3 Arka Yüz Çıkıntı (Back-Face Signature) Testleri

Özellikle kompozit zırhlarda ve kevlar tabakalarda kullanılır [4] ve [5]. Test prosedürü ise şöyle özetlenebilir:

- Temas yüzeyinin arkasına plastilin / balistik jel yerleştirilir,
- Merminin geçişi sonrası oluşan çıkıntı derinliği ölçülür,
- NATO ve NIJ standartları referans alınır.

2.4 Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) Testleri

Süpersonik çarpma anında malzemenin dinamik davranışını modellemek için kullanılır [4] ve [7]. Testin amaçları ise şöyle özetlenebilir:

- Yüksek strain rate (10^3-10^5 s^{-1}) altındaki malzeme davranışını verir,
- Sayısal modeller için Johnson–Cook, Zerilli–Armstrong veya Cowper–Symonds parametreleri çıkarılır.

3. Sayısal (Nümerik) Yöntemler

3.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM)

Yüksek hız çarpma analizlerinde en yaygın yöntemdir. Yöntemi kullanan başlıca yazılımlar şunlardır [3], [4], [5] ve [6]:

- ANSYS Autodyn,
- LS-DYNA,
- ABAQUS Explicit,
- Ansys LS-DYNA Workbench entegrasyonu,
- Abaqus/Explicit.

FEM'in sağladığı çıktılar ise şunlardır:

- Gerilme-şekil değiştirme dağılımı,
- Mermi/zırh etkileşim süresi,
- Sıcaklık artışı ve adyabatik yumuşama,
- Penetrasyon derinliği,
- Mermi kırılması ve parçacık davranışı (erode/contact algoritmaları).

3.2. Süpersonik Balistik Çarpma Analizinde Hidrokodların Rolü

Yüksek hızlı balistik çarpma analizlerinde sonlu elemanlar metoduyla çalışan hidrokodlar kullanılmaktadır [8].

3.2.1. Hidrokod Nedir?

Hidrokodlar (hydrocodes), çok yüksek hızlarda (süpersonik–hipersonik), çok büyük deformasyon içeren, şok dalgası etkili fiziksel olayları çözmek için geliştirilen özel nümerik yazılımlardır. Hidrokodların temel özellikleri şunlardır:

- Şok dalgalarını çözümleyebilirler,
- Malzemenin erime, yoğunluk değişimi, faz dönüşümü, kırılma ve parçalanma gibi karmaşık davranışlarını modelleyebilirler,
- Çok büyük deformasyonlarda mesh çökmesini engelleyen yöntemler (SPH, ALE, Eulerian grid) kullanırlar,
- Balistik penetrasyon, patlama, mermi çarpması, şokla şekillendirme gibi uygulamalarda standart FEM'in yapamadığı durumları çözebilirler.

3.2.2. Neden Süpersonik Mermi-Zırh Problemi İçin Hidrokod Gereklidir?

Süpersonik bir mermi zırha çarptığında:

- Şok dalgası oluşur,
- Adyabatik ısınma → malzemenin lokal erimesi/akması,
- Mermi çekirdeği parçalanır (erosion),
- Zırh tabakaları ayrılır (delaminasyon),
- Partikül saçılması ve spalling meydana gelir,
- Mermi ve zırh malzemesi çok kısa sürede (mikro/milisaneye) büyük deformasyon geçirir,

Bu fiziksel süreçleri klasik Lagrangian-FEM doğru çözemez, çünkü:

- Mesh çökmesi olur,
- Kırılma sonrası parçaların hareketi takip edilemez,
- Şok dalgası iyi modellenemez.

Hidrokodlar ise tam olarak bu problemler için geliştirilmiştir.

3.2.3. Balistik Analizde Kullanılan Hidrokodlar

Tablo 1. Balistik Analizde Kullanılan Hidrokodlar.

Hidrokod / Yazılım	Metodoloji	Kullanım Alanı
ANSYS AUTODYN	Lagrange + SPH + Euler + ALE	Mermi penetrasyonu, patlamalar
LS-DYNA (Explicit)	Lagrange + SPH + ALE + CESE	Penetrasyon, kompozit zırh, delaminasyon
AUTODYN 2D/3D	SPH / Euler / ALE	Zırh ve mermi parçalanması
CTH (Sandia National Labs)	Eulerian	Askeri balistik analizler
EPIC	Lagrange + Euler	Zırh/seramik penetrasyonu
Abaqus/Explicit + SPH	Lagrange + SPH	Zırh tabakalarının ayrılması
RADIOSS	ALE + SPH	Kompozit zırh optimizasyonu

3.2.4. Hidrokodlarda Kullanılan Fiziksel Modeller ve Balistik İlişkisi

Hidrokodların asıl gücü, çok gelişmiş malzeme ve hasar modellerini çözme kapasitesidir.

3.2.4.1 Konstitütif Malzeme Modelleri

Süpersonik çarpma için en yaygın modeller:

- Johnson–Cook Plastik Modeli (Yüksek strain-rate + sıcaklık etkisi → mermi çekirdeği ve çelik zırh için ideal),
- Zerilli–Armstrong Modeli (Metallerde mikroyapı tabanlı davranış),
- Steinberg–Guinan Modeli (Yüksek basınç–yüksek sıcaklık ortamları).

Bu modeller olmadan süpersonik çarpmanın fiziksel gerçekliği yakalanamaz.

3.2.4.2 Hasar ve Kırılma Modelleri

Hidrokodlarda dinamik kırılma şöyle modellenir:

- Johnson–Cook Hasar (dökme çelik, bakır, tungsten çekirdekler),
- GISSMO (Lagrange–SPH hibrit modelleri için ideal),
- Cockcroft–Latham,
- Cumulative Damage Models,
- Erosion algoritmaları (erode, fail, delete) → Mermi çekirdeğinin parçalanmasını simüle eder.

3.2.4.3 EOS – Equation of State (Durum Denklemleri)

Supersonik çarpma sırasında hem mermi hem zırh üzerinde basınçlar GPa mertebesine çıkar. Hidrokodlar, bu basınçları çözmek için Durum Denklemleri (EOS) kullanır. Bunların başlıcaları:

- Mie–Grüneisen EOS,
- Jones–Wilkins–Lee (JWL) (patlayıcı içeren mermilerde),
- Tillotson EOS (yüksek hızlı çarpma),

FEM yazılımlarında EOS genellikle yoktur → bu yüzden hidrokod şarttır.

3.2.5. Hidrokodlarda Kullanılan Sayısal Yöntemler

3.2.5.1 Lagrangian Yöntem

- Katı cisimler için kullanılır,
- Küçük/makul deformasyonlarda iyi çalışır,
- Çarpma bölgesinde mesh çöker → SPH veya ALE’ye geçilir.

Balistik kullanımı: Merminin ilk deformasyonu.

3.2.5.2 Eulerian Yöntem

- Mesh sabittir, malzeme hücrelerin içinden akar,
- Büyük deformasyon ve parçalanma için idealdir,
- Şok dalgaları için çok başarılıdır.

Balistik kullanımı: Zırh/mermi yüksek deformasyonu + şok etkileri.

3.2.5.3 SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)

Bu yöntemde Mesh yoktur. Parçalanma ve akma çok iyi modellenir. Gözlemlenebilen çıktılar:

- Mermi çekirdeğinin dağılması,
- Zırhtaki spalling ve kırılma konisi.

Balistik kullanımı: Penetrasyon ve krater oluşumu.

3.2.5.4 ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian)

Lagrange (katı) + Euler (akışkan/gaza dönüşen bölge) yöntemlerini birlikte kullanabilen hibrit bir yöntemdir. Bu sayede:

- Mesh hem hareket edebilir hem de akış alabilir,
- Lagrangian + Euler avantajlarını birleştirir.

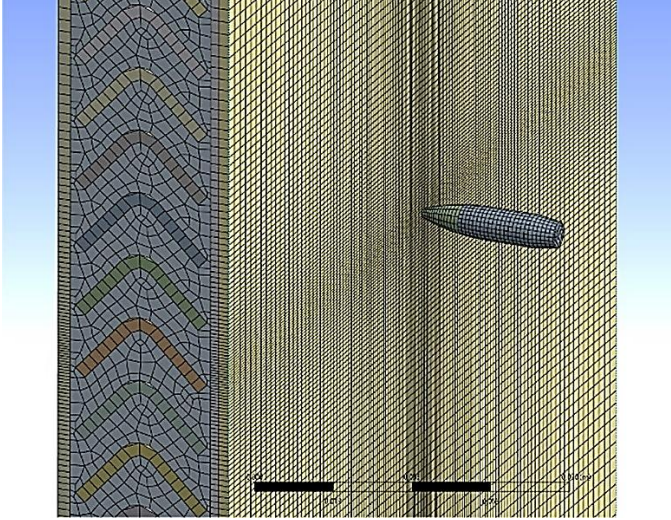
Balistik kullanımı: Zırh tabakalarının ayrılması ve kompozit zırh hasarı.

3.2.6. Süpersonik Mermi – Zırh Etkileşiminin Hidrokod ile Çözümü

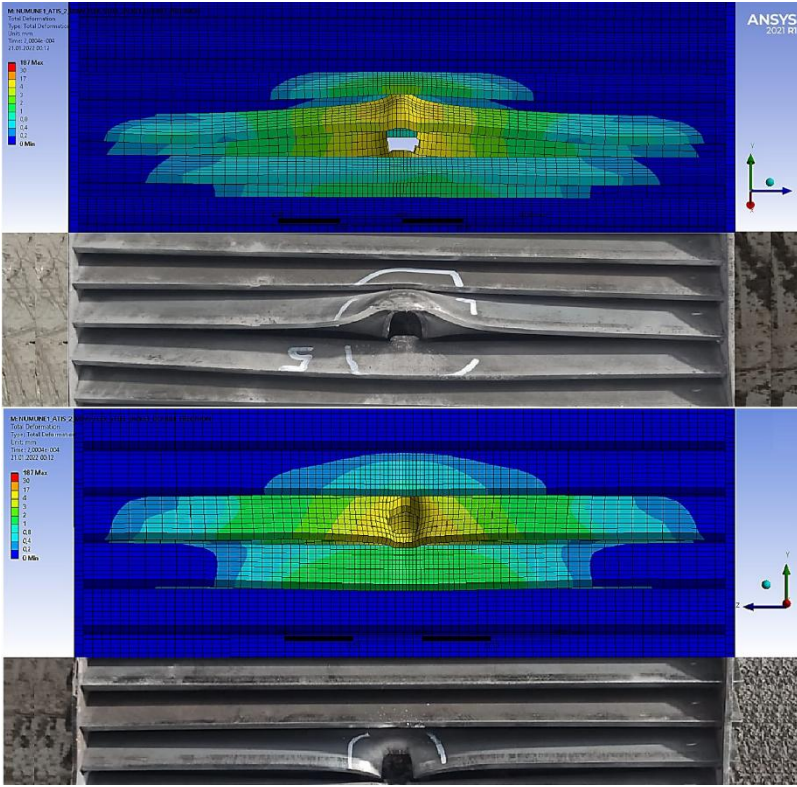
Tipik bir hidrokod çözüm akışı şöyledir:

- Geometri oluşturma (ANSYS, SolidWorks modeli içe aktarma),
- Malzeme modellerinin tanımlanması (Johnson–Cook + EOS),
- Mermi ve zırh için bölge seçimleri (Lagrange, Euler, SPH veya ALE),
- Temas (Contact) tanımları,
- Çarpma hızı (800–1200 m/s),
- Çözüm zaman aralığı (10^{-6} – 10^{-8} s),
- Penetrasyon, şok dalgası, parçalanma sonuçlarının incelenmesi,
- V50 balistik limitinin hesaplanması,
- Sonuçların deneysel atış testi ile karşılaştırılması.

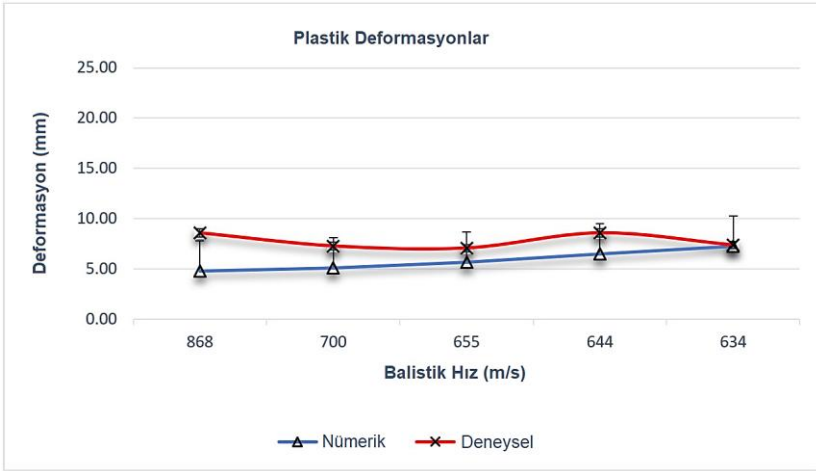
Şekil 3 de bir zırh sistemine ait FEM modeli görülmektedir [9]. Şekil 4 de ise, Nümerik analiz ve atış test sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 5 de, [9] çalışmasında tasarlanan sistemin merminin ilk çarptığı ön plakasındaki deformasyonların deneysel ve nümerik karşılaştırması görülmektedir.



Şekil 10. Zırh sistemi FEM modeli [9].



Şekil 11. Nümerik analiz ve atış testi sonuçlarının karşılaştırılması [9]



Şekil 12. Zırh sistemi ön plakasında oluşan plastik deformasyonların deneysel ve nümerik karşılaştırması grafik sunum [9].

3.2.7. Hidrokodların Avantajları

Hidrokodlar olmadan süpersonik balistik çarpma analizi gerçekçi olarak çözülemez. Hidrokodların balistik analizde getirdiği avantajlar Tablo 2 de verilmiştir.

Tablo 2. Hidrokodların Balistik Analizde Getirdiği Avantajlar.

Hidrokod Avantajı	Balistik Çarpma ile İlişkisi
Şok dalgası çözümü	Süpersonik çarpmanın ana fiziği
Meshin çökmemesi	Mermi/zırh parçalanması
SPH/ALE modelleri	Kompozit zırh delaminasyonu
EOS kullanımı	Çok yüksek basınç etkileri
Hasar modelleri	Krater, koni kırılması, dökülme
Faz dönüşümü modelleme	Adyabatik ısınma ve akma
Kısa çözüm süresi	Atış testi öncesi optimizasyon

3.3. Sonlu Hacimler Yöntemi (Finite Volumes Method- FVM) – CFD Tabanlı Yaklaşım

Süpersonik çarpma anında şok dalgaları, bow shock ve ısı akı artışı incelenebilir.

- ANSYS Fluent, OpenFOAM gibi yazılımlar,
- Çarpma öncesi aerodinamik kararlılık analizi,
- Mermi etrafında Mach disk (sonik şok halkaları) oluşumu.

Bu yöntem doğrudan penetrasyonu çözmez ancak çarpma öncesi merminin stabilitesi için kritiktir.

3.4. Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)

Özellikle yüksek hızlı penetrasyonda büyük deformasyonlar için idealdir.

Özellikleri:

- Model ızgarasızdır (grid) → mesh çökmesi yoktur,
- Mermi ve zırh parçalanmasını doğru verir,
- Autodyn, LS-DYNA ve Abaqus SPH modülleri kullanılır.

Kullanım alanları:

- Delme/krater oluşumu,
- Parçacık saçılması,
- Adyabatik kesme bantlarının modellenmesi.

3.5. Parçalanma ve Erozyon Modelleri

Yüksek hızlı mermi çarpmasında en kritik konulardan biri malzemenin hangi noktada kırılacağıdır.

Yaygın modeller:

- Johnson–Cook Hasar Modeli,
- GISSMO (Generalized Incremental Stress State Model),
- Cockcroft–Latham kriteri,
- Brozzo, Ayada, Bressan kriterleri,

Bu modeller penetrasyon derinliği ve kırılma desenini doğru öngörmek için kullanılır.

4. Hibrit Yöntemler

Gerçekçi sonuçlar için çoğu çalışmada deneysel + nümerik hibrit yaklaşım kullanılır.

Örnek süreç:

- a. SHPB ile malzemeye ait dinamik parametreler çıkarılır,
- b. Bu parametreler FEM/SPH yazılımına tanımlanır,
- c. Balistik atış testi yapılır,
- d. Nümerik sonuçlar deneysel sonuçlarla kalibre edilir,
- e. Farklı zırh/mühimmat senaryoları simülasyonla optimize edilir.

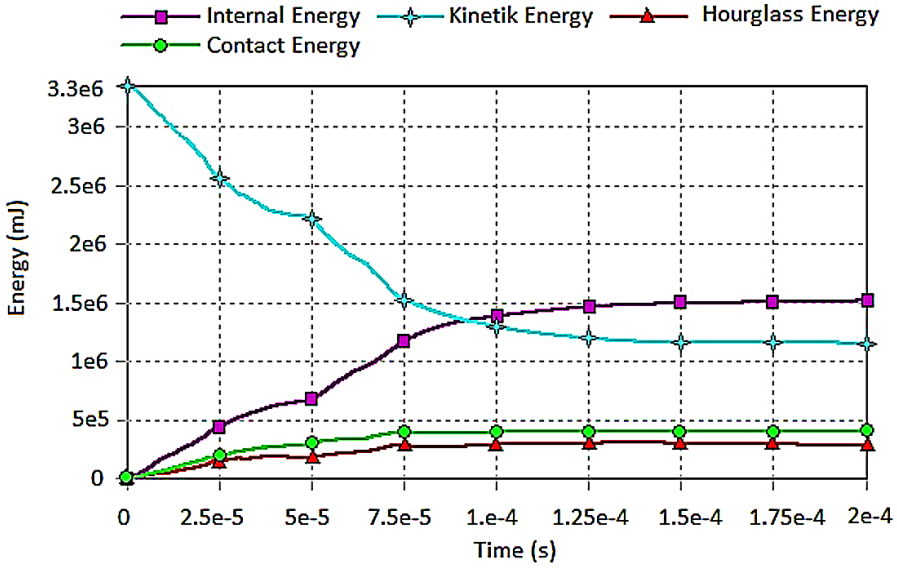
5. Değerlendirme Kriterleri

5.1 Balistik Limit (V50)

- %50 penetrasyon ihtimalinin olduğu hız,
- Hem deneysel hem nümerik olarak hesaplanabilir.

5.2 Enerji Soğurma Kapasitesi

- Zırhın kinetik enerjiyi ne kadar absorbe ettiği (Şekil6),



Şekil 13. Balistik analizde enerji korunumu grafiği [9].

5.3 Çapraz Laminasyon Hasarı (Kompozitler)

- Delaminasyon miktarı,
- Lif kırılması,
- Matris çatlağı.

5.4 Arka Yüz Deformasyon Sınırları

- NIJ 0101.06 / NIJ 0101.07 ve STANAG standartları temel alınır [10].

6. Sonuç

Süpersonik mermilerin zırhlarla etkileşimi hem malzeme bilimi hem yüksek hız dinamiği hem de nümerik yöntemler açısından kompleks bir problemdir. Bu nedenle modern balistik çalışmaları mutlaka hem deneysel doğrulama hem de yüksek çözünürlüklü nümerik simülasyonlar ile yürütülmektedir.

Kaynaklar

- [1] Farrand, T. G., (1991), “Various Target Material Failure Mechanisms Observed for Ballistic Penetrations,” U.S. Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD.
- [2] Camcı E., Caliskan M., Tural B., Ergü E., Fındık F., (2024), Investigation of the Performance of a V-shaped Inner Plate Array Armor System Against 7.62 mm Caliber Bullets, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*.
- [3] Öztürk, G. (2010). *Numerical and experimental investigation of perforation of ST-37 steel plates by oblique impact* (Master’s thesis, Middle East Technical University).
- [4] Bian, J., Dai, K., Lv, X., Huang, Z., Wu, G., & Zhang, Y. (2024). Effect of material and structure of ultra-high-molecular-weight polyethylene body armor on ballistic limit velocity: Numerical simulation. *Polymers*, 16(21), 2985.
- [5] Berk, B., Karakuzu, R., & Toksoy, A. K. (2017). An experimental and numerical investigation on ballistic performance of advanced composites. *Journal of Composite Materials*, 51(25), 3467–3480.
- [6] Ding, L., Gu, X., Shen, P., & Kong, X. (2022). Ballistic limit of UHMWPE composite armor under impact of ogive-nose projectile. *Polymers*, 14(22), 4866. <https://doi.org/10.3390/polym14224866>
- [7] He, C., Liu, Y., Yao, Y., & Chen, Q. (2023). Experimental and numerical investigation of ballistic resistance of polyurea-coated aluminum plates under projectile impacts. *Crystals*, 13(7), 1039.
- [8] Clayton, J. D. (2015). Modeling and simulation of ballistic penetration of ceramic–metal armor by tungsten alloy rods. *Advances in Materials Science and Engineering*, Article 709498.
- [9] Caliskan, M., Camcı, E., & Findik, F. (2022). Numerical and experimental investigation of the ballistic performance of the armor structure with in-layer deflector against bullets. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 19(8), e470.
- [10] NIJ 0101.07 National Institute Of Justice, Standard Body Armor Ballistic Resistance of Body Armor, 2024 U.S. Department of Justice.

BÖLÜM 10

LI-ION Batarya Yönetim Sistemlerinde Yapay Zekâ Tabanlı SOH ve SOC Tahmini

Ayhan Aydın¹

¹ Ankara University, Nallıhan Vocational School, Computer Programming Program,
06920 Nallıhan, Ankara, ORCID: 0000-0001-7938-0509

1. Giriş

Enerji dönüşümü, elektrifikasyon ve iklim kriziyle mücadele politikaları, hem ulaşım hem de elektrik şebekeleri tarafında batarya tabanlı enerji depolamayı kritik hâle getirmiştir. Elektrikli araçlar (EV), dağıtık enerji depolama sistemleri, şebeke ölçekli batarya bankları ve endüstriyel uygulamalar, büyük oranda Li-ion batarya teknolojilerine dayanmaktadır. Li-ion bataryaların tercih edilme nedenleri arasında yüksek enerji yoğunluğu, yüksek çevrim ömrü, düşük kendiliğinden deşarj oranı ve bakım gereksiniminin rakiplerine göre az olması sayılabilmektedir (Zhao ve ark., 2024; Sui ve ark., 2021).

Bununla birlikte Li-ion bataryalar; sıcaklık, akım profili, deşarj derinliği ve kullanım senaryosu gibi etmenlere oldukça duyarlı, karmaşık elektro-kimyasal sistemlerdir. Zaman içerisinde kapasite kaybı, iç direnç artışı ve performans düşüşü yaşanır. Bu nedenle bataryaların anlık doluluk durumunun (SOC) ve uzun vadeli sağlık durumunun (SOH) doğru tahmin edilmesi hem güvenlik hem de ekonomi açısından kritik öneme sahiptir. Yanlış SOC tahmini, beklenmedik enerji bitmesi, menzil tahmin hataları veya gereksiz koruma devresi müdahalelerine yol açabilmektedir. Hatalı SOH tahmini ise bataryanın ömrü, bakım planlaması ve ikincil kullanım uygulamaları üzerinde doğrudan etkilidir (Hannan ve ark., 2017; Kim ve ark., 2023).

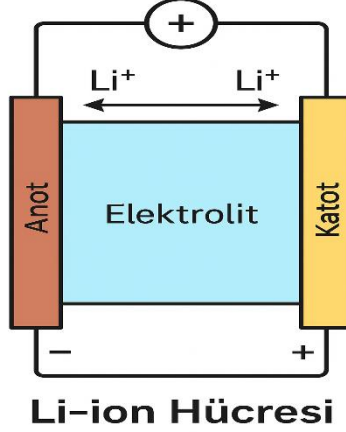
Geleneksel BMS uygulamalarında SOC tahmini için Coulomb sayımı, açık devre gerilimi (OCV) tabanlı yöntemler ve eşdeğer devre modeli (Equivalent Circuit Model – ECM) tabanlı gözleyici yaklaşımlar (Kalman filtresi, genelleştirilmiş gözleyici vb.) kullanılmaktadır. SOH tahmini ise genellikle kapasite oranı, iç direnç artışı veya belirli sağlık göstergeleri üzerinden, deneysel veya yarı-ampirik modellerle yapılmaktadır (Liu ve ark., 2022; Behnamgol ve ark., 2024). Ancak bu yöntemler doğruluk–hesaplama karmaşıklığı–genellenebilirlik üçgeninde çeşitli kısıtlamalar taşımakta ve farklı kullanım koşullarına uyarlanmaları çoğu zaman zor kabul edilmektedir.

Son yıllarda makine öğrenmesi (Destek Vektör Regresyonu (SVR), Rastgele Orman Regresyonu (RF veya RFR), Gauss Süreçleri Regresyonu (GPR) vb.) ve derin öğrenme (LSTM, GRU, CNN, Transformer tabanlı modeller) tabanlı veri odaklı yaklaşımlar, SOC ve SOH tahmini için yoğun olarak kullanılmaya başlanmıştır (Liu ve ark., 2022; Tian ve ark., 2023; Sui ve ark., 2021; Kim ve ark., 2023). Li-ion batarya temelleri ve BMS işlevleri ile SOC ve SOH kavramlarını açıklamak; geleneksel SOC/SOH tahmin yöntemlerini özetlemek; YZ tabanlı yaklaşımları ayrıntılı biçimde incelemek ve hem SOC hem de SOH için uygulanabilir genel bir YZ tabanlı BMS metodu önermektir.

2.1. Li-ion Batarya Temelleri ve BMS'in Rolü

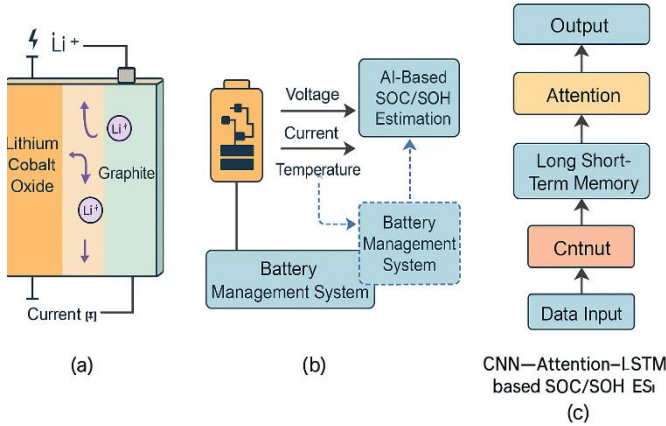
Li-ion bataryalar, anot (genellikle grafit), katot (NMC, NCA, LFP gibi farklı kimyalar), ayırıcı ve organik elektrolit bileşenlerinden oluşur. Şarj/deşarj

sırasında Li^+ iyonları anot ve katot arasında göç ederken, elektronlar harici devre üzerinden ilerleyerek elektriksel enerji sağlar. Döngüsel şarj-deşarj süreçleri boyunca SEI (solid electrolyte interphase) tabakasının oluşumu ve büyümesi, aktif materyal kaybı ve elektrolit bozulması gibi mekanizmalar geri dönüşümsüz kapasite kayıplarına yol açar (Zhao ve ark., 2024; Kim ve ark., 2023).



Şekil 1. Basitleştirilmiş Li-ion hücresi şematik gösterimi.

Batarya Yönetim Sistemi (BMS), bataryanın güvenli sınırlar içerisinde çalışmasını sağlamak üzere gerilim, akım ve sıcaklık ölçümlerini sürekli izleyen; SOC ve SOH tahmini yapan; hücre dengeleme, termal yönetim ve koruma fonksiyonlarını yürüten bir gömülü sistemdir. Gelişmiş bir BMS tipik olarak hücre gerilimi, akım ve sıcaklık ölçümü; SOC ve SOH tahmini; hücre dengeleme; termal yönetim; güvenlik ve koruma; hata tespiti ve haberleşme fonksiyonlarını içerir (Hannan ve ark., 2017; Xu ve ark., 2025).



Şekil 2. YZ tabanlı SOC/SOH tahmini içeren genel BMS blok diyagramı.

Modern BMS mimarilerinde haberleşme katmanı (CAN, LIN, FlexRay vb.), batarya sisteminin araç kontrol ünitesi veya enerji yönetim sistemi ile bilgi alışverişini sağlar. Bu nedenle, SOC ve SOH tahmin modellerinin sadece doğru olması değil, aynı zamanda belirli zaman kısıtları altında tahmin üretebilmesi ve standartlara uyumlu olarak çalışması da önemlidir (Xu ve ark., 2025).

2.2. SOC Kavramı ve Geleneksel Tahmin Yöntemleri

SOC, bataryanın mevcut kapasitesinin nominal kapasiteye oranı olarak tanımlanır ve genellikle yüzde (%) cinsinden ifade edilir. Bir başka ifadeyle SOC, bataryada ne kadar "kullanılabilir enerji" kaldığını gösteren durumsal bir değişkendir. Doğru SOC tahmini, aşırı şarj/deşarjın önlenmesi, menzil tahmini ve enerji yönetimi açısından kritik öneme sahiptir (Hannan ve ark., 2017; Zhao ve ark., 2024).

Coulomb sayımı yönteminde SOC, ölçülen akımın zamana göre integralinin alınmasıyla tahmin edilir. Akım sensöründeki ofset hataları, entegrasyon hataları ve nominal kapasite belirsizliği bu yöntemin zamanla drift yapmasına neden olur. OCV–SOC eğrisi, durağan koşullarda SOC tahmini için değerlidir; ancak tam durağanlık için uzun bekleme süreleri gerekebilir. Eşdeğer devre modeline dayalı Kalman filtresi türevleri ise model parametrelerine oldukça duyarlıdır (Behnamgöl ve ark., 2024; Hannan ve ark., 2017).

Model tabanlı yöntemlerin en önemli avantajı, fiziksel anlam içeren parametrelere sahip olmaları ve farklı çalışma koşullarına fiziksel kısıtlar üzerinden uyarlanabilmeleridir. Ancak parametrik belirsizlikler, sıcaklık bağımlılığı ve yaşlanma etkileri bu modellerin bakım maliyetini artırır. Bu nedenle, model tabanlı ve veri tabanlı yaklaşımların hibrit olarak bir arada kullanıldığı YZ destekli BMS yapıları da literatürde giderek daha fazla yer bulmaktadır (Liu ve ark., 2022; Sui ve ark., 2021).

2.3. SOH Kavramı ve Geleneksel Tahmin Yöntemleri

SOH, bataryanın yaşlanma ve performans kaybını ifade eden bir büyüklüktür ve çoğunlukla kapasite oranı veya iç direnç değişimi üzerinden tanımlanır. Kapasiteye dayalı SOH, mevcut kapasitenin yeni batarya kapasitesine oranı olarak; direnç temelli SOH ise yeni ve yaşlanmış iç direnç değerlerinin oranı üzerinden tanımlanır (Sui ve ark., 2021; Peng ve ark., 2024).

Laboratuvar ortamında tam şarj–tamdeşarj çevrimleriyle kapasite belirlenebilir; ancak bu yöntem pratikte zaman alıcı ve maliyetlidir. Incremental Capacity (IC) ve Differential Voltage (DV) analizleri, belirli gerilim aralıklarında kapasite değişimi profillerini kullanarak yaşlanmayı karakterize eder. Elektrokimyasal model tabanlı parametre tahmini yöntemleri ise daha fazla hesaplama yükü ve ayrıntılı modelleme gerektirir (Hamed ve ark., 2023; Jong, 2022; Peng ve ark., 2024).

SOH tahmini, çoğu zaman Remaining Useful Life (RUL) tahmini ile birlikte ele alınır. Bu durumda amaç, bataryanın belirli bir SOH eşığının altına düşeceği çevrim sayısını ya da kullanım süresini tahmin etmektir. Böylece bakım planlaması, garanti yönetimi ve ikinci ömür (second-life) uygulamalarına karar vermek mümkün olur (Kim ve ark., 2023).

2.4. SOC ve SOH Tahmininde Yapay Zekâ ve Veri Odaklı Yaklaşımlar

Veri odaklı yaklaşımlar, Li-ion bataryaların gerçek kullanım koşullarındaki karmaşık davranışlarını doğrudan ölçüm verileri üzerinden öğrenmeyi hedefler. Giriş olarak genellikle gerilim, akım, sıcaklık zaman serileri, şarj/deşarj eğrileri ve bunlardan türetilen istatistiksel veya fiziksel özellikler kullanılır; çıkış olarak ise SOC, SOH veya RUL tahmin edilir (Liu ve ark., 2022; Sui ve ark., 2021; Kim ve ark., 2023).

Makine öğrenmesi tabanlı yöntemler arasında Destek Vektör Regresyonu (SVR), Rastgele Orman (Random Forest), k-en Yakın Komşu (k-NN), Gaussian Process Regression (GPR) ve gradyan artırılmalı ağaçlar (XGBoost, LightGBM) SOC ve SOH tahmini için sıkça kullanılmaktadır. Bu yöntemler özellikle küçük ve orta boyutlu veri setlerinde ve gömülü sistemlerde hesaplama maliyetinin kritik olduğu durumlarda avantaj sağlar (Sui ve ark., 2021; Kim ve ark., 2023; Koç, 2023).

Derin öğrenme tabanlı yöntemler arasında LSTM ve GRU ağırları, uzun vadeli bağımlılıkları yakalayabilme yeteneği sayesinde özellikle zaman serisi verisinden SOC tahmini için yaygınlaşmıştır. CNN tabanlı modeller gerilim–akım–sıcaklık eğrilerinden lokal özellikleri çıkararak SOC ve SOH tahmininde yüksek performans elde etmektedir. CNN–LSTM veya dikkat (attention) mekanizmalı hibrit modeller, hem lokal hem de uzun menzilli zamansal bağımlılıkları bir arada öğrenerek doğruluğu artırır (Liu ve ark., 2022; Tian ve ark., 2023; Zhao ve ark., 2024; Lin ve ark., 2024).

Son yıllarda, Transformer tabanlı yapılar ve çok başlıklı dikkat (multi-head attention) mekanizmaları kullanılarak SOC ve SOH tahmininin aynı ağ içinde birlikte yapılabildiği çok görevli (multi-task) öğrenme yaklaşımları da önerilmektedir. Bu tür modeller, veri temsillerinin SOC ve SOH için ortak kısmını paylaşarak parametre sayısını azaltmakta ve modelin genellenebilirliğini artırmaktadır (Zheng ve ark., 2024; Kim ve ark., 2023).

2.5. Li-ion Batarya Modelleri ve Parametre Tanımlama

YZ tabanlı yöntemler çoğu zaman doğrudan veri odaklı olsa da, Li-ion bataryaların fiziksel davranışını temsil eden eşdeğer devre modelleri (ECM) ve elektro-kimyasal modeller, veri setlerinin yorumlanması ve hibrit yapılar tasarlanması açısından kritik öneme sahiptir. En yaygın kullanılan ECM yapıları, Thevenin modeli, çift RC ağırları ve Randles tipi yapılarıdır (Behnamgol ve ark., 2024).

Parametre tanımlama, genellikle farklı akım darbeleri altında elde edilen gerilim yanıtlarının optimizasyon problemi olarak ele alınmasıyla gerçekleştirilir. En küçük kareler (LS), parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ve diğer meta-sezgisel algoritmalar parametre tahmini için sıkça kullanılmaktadır. Bu parametreler daha sonra Kalman filtresi veya genişletilmiş Kalman filtresi (EKF) gibi gözleyicilerde SOC tahmini için kullanılmaktadır (Liu ve ark., 2022; Behnamgol ve ark., 2024).

Elektro-kimyasal modeller (örneğin Doyle–Fuller–Newman (DFN) modeli), daha yüksek doğruluk sağlamakla birlikte, hesaplama maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle gerçek zamanlı BMS uygulamalarında doğrudan kullanılmaları zordur. Bunun yerine, elektro-kimyasal modellerden üretilen yüksek kaliteli simülasyon verileri, YZ tabanlı modellerin eğitimi için sentetik veri kaynağı olarak kullanılmaktadır (Tian ve ark., 2023).

2.6. Veri Kümeleri ve Deney Düzenleri

Li-ion batarya SOC/SOH modellemesinde kullanılan veri kümeleri; deney düzeni, sıcaklık aralığı, akım profili ve kullanılan kimya bakımından önemli farklılıklar göstermektedir. En bilinen açık veri kümelerinden biri NASA Prognostics Center of Excellence (PCoE) tarafından paylaşılan Li-ion batarya yaşlanma verileridir (NASA PCoE, 2024). Bu veri setinde, sabit akım ve karma sürüş profilleri altında test edilmiş hücrelerin çok sayıda çevrime ait gerilim, akım, sıcaklık ve kapasite bilgileri bulunmaktadır.

Benzer şekilde çeşitli üniversiteler ve araştırma merkezleri tarafından paylaşılan veri kümeleri, farklı kimyalar (NMC, LFP), farklı sıcaklık seviyeleri ve farklı C oranlarını içermektedir. Araştırmacılar, bu veri kümelerini kullanarak önerdikleri modellerin genellenabilirliğini ve sağlamlığını karşılaştırabilmektedir. Veri kümesinin çeşitliliği, YZ tabanlı modellerin gerçek dünyadaki performansını doğrudan etkilemektedir (Liu ve ark., 2022; Sui ve ark., 2021).

Kendi veri kümesini üretecek araştırmacılar için, farklı sıcaklıkta testler, farklı akım profilleri (sabit akım, sabit güç, sürüş çevrimleri) ve periyodik tam şarj–tam deşarj testleri tasarlamak, hem SOC hem de SOH tahmini için zengin ve dengeli bir veri tabanı oluşturmayı mümkün kılacaktır (Hannan ve ark., 2017; Kim ve ark., 2023).

3. Metot

Bu bölümde hem SOC hem de SOH tahmini yapabilen genel bir yapay zekâ tabanlı BMS çerçevesi ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Metot dört temel katmandan oluşmaktadır: (i) veri toplama ve ön işleme, (ii) özellik çıkarımı ve seçimi, (iii) YZ tabanlı SOC/SOH tahmin modülleri ve (iv) BMS entegrasyon ve karar destek katmanı.

3.1. Genel Sistem Mimarisi

Veri toplama katmanında hücre/modül gerilimi, akım ve sıcaklık değerleri yüksek örnekleme hızında kaydedilir. NASA ve benzeri açık veri tabanlarında olduğu gibi, farklı akım profilleri ve sıcaklıklarda test edilmiş bataryaların döngü verileri model eğitiminde kullanılabilir (NASA PCoE, 2024). Ön işleme adımında gürültü filtreleme, ofset düzeltmeleri, eksik veri temizleme ve normalizasyon işlemleri uygulanır (Kim ve ark., 2023; Liu ve ark., 2022).

Veri daha sonra eğitim, doğrulama ve test kümelerine ayrılır. Literatürde tipik olarak veri setinin %60–70'i eğitim, %15–20'si doğrulama, geri kalanı ise test için ayrılmaktadır. Özellikle zaman serisi verisinde, veri bölünürken zaman sıralamasının korunması ve geleceğe ait bilgilerin eğitim aşamasına sızması son derece önemlidir (Tian ve ark., 2023).

3.2. Özellik Çıkarımı ve Seçimi

SOC ve SOH tahmini için zaman alanı, frekans alanı, türev ve eğri tabanlı özellikler ile Incremental Capacity (IC) ve Differential Voltage (DV) analizlerinden türetilen parametreler kullanılabilir. Zaman alanı özellikleri arasında maksimum/minimum gerilim ve akım değerleri, ortalama ve RMS değerleri, belirli gerilim aralıklarında geçen süreler sayılabilir (Hamed ve ark., 2023; Jong, 2022).

IC ve DV analizleri, özellikle SOH tahmini için oldukça değerlidir. Gerilim-kapasite eğrisinin türevleri, anot ve katot malzemelerinin faz geçişlerini ve elektrot dengesizleşmesini yansıtır. IC eğrisindeki pik konumlarının kayması ve genliklerin azalması, yaşlanma ile ilişkilendirilebilir. Bu paternler YZ modelleri için güçlü girdi özellikleri sunar (Hamed ve ark., 2023; Peng ve ark., 2024).

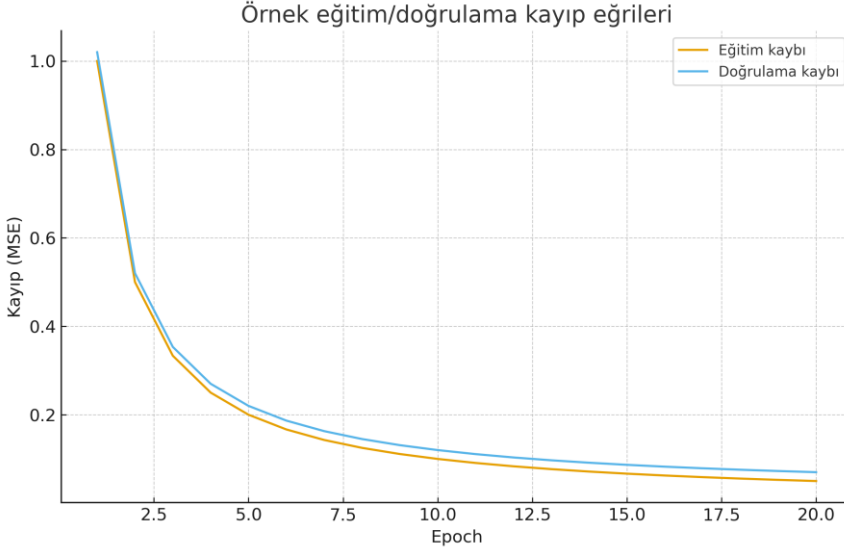
Özellik seçiminde, Pearson korelasyonu, karşılıklı bilgi ve düzenleştirmeli modeller (örneğin LASSO) yardımıyla en anlamlı özellikler seçilerek aşırı uyum riski azaltılır. Ayrıca, yüksek boyutlu özellik vektörlerinin boyut indirgeme teknikleri (PCA, t-SNE) ile daha düşük boyutlu temsilin çıkarılması da modele giriş olarak kullanılabilir (Sui ve ark., 2021).

3.3. YZ Tabanlı SOC Tahmin Modülü

Önerilen SOC tahmin modülü, CNN–Attention–LSTM tabanlı hibrit bir yapıya sahiptir. Girdi olarak belirli bir pencere uzunluğundaki V–I–T zaman serisi segmenti alınır. CNN katmanı ile lokal paternler çıkarılır; attention katmanı önemli zaman dilimlerine daha fazla ağırlık verir; LSTM katmanları ise uzun vadeli dinamikleri öğrenir. Son katmanda yoğun (dense) katman üzerinden SOC tahmini üretilir (Tian ve ark., 2023; Lin ve ark., 2024).

Model, ortalama karesel hata (MSE) kayıp fonksiyonu ve Adam optimizasyon algoritması ile eğitilir. Erken durdurma ve öğrenme oranı düşürme stratejileri, aşırı uyumu önlemek için kullanılır. Hiperparametre optimizasyonu grid search,

Bayesian optimizasyon veya Hyperband gibi yöntemlerle gerçekleştirilebilir. Özellikle gizli katman sayısı, nöron sayısı, pencere uzunluğu, öğrenme oranı ve düzenleme katsayıları model başarımını önemli ölçüde etkiler (Kim ve ark., 2023).



Şekil 3. Örnek eğitim ve doğrulama kayıp eğrileri (MSE).

Eğitim sürecinde eğitim ve doğrulama kayıp eğrilerinin birlikte izlenmesi, aşırı uyum ve yetersiz öğrenme durumlarının tespit edilmesini kolaylaştırır. Eğitim kaybı azalırken doğrulama kaybının artmaya başladığı nokta, erken durdurma için uygun bir aday epoch olarak değerlendirilebilir (Tian ve ark., 2023).

3.4. YZ Tabanlı SOH Tahmin Modülü

SOH tahmini için döngü bazlı kapasite düşüşünü modelleyen LSTM tabanlı yapılar veya şarj eğrisi segmentlerinden kapasite tahmini yapan CNN tabanlı modeller kullanılabilir. NASA veri setine dayalı çalışmalarda derin öğrenme modellerinin geleneksel yöntemlere göre daha düşük hata seviyeleri sağladığı görülmüştür (Bairwa ve ark., 2025; Sui ve ark., 2021).

LSTM tabanlı modellerde her bir döngü için elde edilen özellik vektörü (örneğin, sabit akım şarj segmentindeki zaman, belirli gerilim aralıklarında geçen süre, IC pik pozisyonları vb.) girdi olarak kullanılır. Çıkış olarak kapasite oranı (SOH) tahmin edilir. Böylece model döngüler arasındaki eğilimleri öğrenerek bataryanın uzun vadeli davranışını temsil edebilir (Bairwa ve ark., 2025; Kim ve ark., 2023).

Ortak özellik çıkarım katmanları ile parametre sayısı azaltılmakta, SOC ve SOH başlıklarında ise her bir görev için özelleşmiş katmanlar kullanılmaktadır.

3.5. BMS Entegrasyonu ve Gerçek Zamanlı Çalışma

YZ tabanlı SOC/SOH modellerinin gerçek zamanlı BMS'e entegrasyonu için hesaplama maliyeti, bellek kullanımı ve güvenilirlik konuları kritik öneme sahiptir. Model sıkıştırma, kuantizasyon ve TinyML yaklaşımları sayesinde mikrodenetleyici tabanlı sistemlerde derin öğrenme modellerinin uygulanabilirliği artmaktadır. Özellikle 8–32 bit mikrodenetleyicilerde çalışan BMS donanımlarında, düşük parametrelili ve sabit nokta (fixed-point) temsiline uygun modeller tercih edilmektedir (Xu ve ark., 2025).

Emniyet açısından YZ modelinin tahminleri, basit ve iyi bilinen yedek yöntemlerle (örneğin Coulomb sayımı) birlikte kullanılmalı ve tahminler arasında tutarsızlık oluştuğunda sistem güvenli moda geçebilmelidir (Kim ve ark., 2023).

3.6. Örnek Uygulama Akışı

Örnek bir SOC/SOH tahmin projesi şu adımları içerebilir: (i) NASA veya benzeri bir veri kümesinin seçilmesi, (ii) veri ön işleme ve temizleme, (iii) IC ve DV analizi ile özellik çıkarımı, (iv) CNN–LSTM tabanlı bir mimari tasarımı, (v) eğitim, doğrulama ve test aşamalarının yürütülmesi, (vi) modelin gömülü BMS prototipine entegrasyonu ve donanım üzerinde deneysel doğrulama. Her adımda uygun performans metriklerinin (RMSE, MAE, R^2 , MAPE vb.) raporlanması ve belirsizlik analizi, sonuçların bilimsel niteliğini güçlendirecektir (Tian ve ark., 2023; Kim ve ark., 2023).

4. Sonuç ve Gelecek Araştırmalar

Genel olarak derin öğrenme tabanlı yöntemlerin, özellikle karmaşık ve değişken çalışma koşullarında geleneksel yöntemlere göre daha yüksek doğruluk ve genellenebilirlik sunduğu; ancak model başarısının kullanılan veri setinin çeşitliliğine ve kalitesine son derece bağlı olduğu görülmektedir. Veri toplama sürecinde farklı sıcaklık, akım profili ve kullanım senaryolarının dikkate alınması, geliştirilen modellerin sahadaki gerçek davranışı yansıtabilmesi için gereklidir (Liu ve ark., 2022; Sui ve ark., 2021).

Gelecek araştırmalar için transfer öğrenme, federatif öğrenme, açıklanabilir YZ ve birleşik SOC–SOH–RUL tahmin çerçeveleri öne çıkan başlıklar arasındadır. Transfer öğrenme sayesinde bir batarya kimyası veya üreticisinde eğitilen modelin, minimum ek veriyle farklı sistemlere uyarlanması mümkün olabilir. Federatif öğrenme ise veri gizliliğini koruyarak filoların dağıtık biçimde öğrenmesini ve merkezi bir modelin güncellenmesini sağlayabilir (Kim ve ark., 2023).

Açıklanabilir YZ (XAI) yaklaşımları, kritik güvenlik uygulamalarında model kararlarının yorumlanabilir olmasını sağlamak açısından büyük önem taşımaktadır. SOC ve SOH tahminlerinde hangi giriş özelliklerinin veya zaman

segmentlerinin etkili olduğunun açıklanması, hem mühendisler hem de denetleyici kurumlar için şeffaflık sağlayacaktır. Son olarak, SOC, SOH ve RUL tahminlerinin tek bir çerçevede birleştirildiği ve BMS'in hem kısa vadeli hem de uzun vadeli kararları aynı anda desteklediği akıllı enerji yönetimi sistemleri, önümüzdeki yılların önemli araştırma alanlarından biri olacaktır (Zhao ve ark., 2024; Xu ve ark., 2025).

Kaynakça

- Bairwa, B., ve ark. (2025). Cycle based state of health estimation of lithium ion cells using deep learning. Scientific Reports.
- Behnamgol, V., ve ark. (2024). Comprehensive review of lithium-ion battery state of charge estimation methods. Energies.
- Hamed, H., ve ark. (2023). An incremental capacity analysis-based state-of-health estimation method for lithium-ion batteries. Batteries.
- Hannan, M. A., ve ark. (2017). A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 78, 834–854.
- Jong, C. S. (2022). Incremental capacity analysis on module level Li-ion batteries. University of Twente.
- Kim, E., Kim, M., Kim, J., ve ark. (2023). Data-driven methods for predicting the state of health, state of charge, and remaining useful life of Li-ion batteries: A comprehensive review. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 24, 1281–1304.
- Koç, Y. (2023). State of health estimation for Li-ion batteries using machine learning methods. Journal of Emerging Science and Technology.
- Lin, S. L., ve ark. (2024). Deep learning-based state of charge estimation for electric vehicle batteries. Heliyon.
- Liu, Y., ve ark. (2022). A review of lithium-ion battery state of charge estimation based on deep learning: Directions for improvement and future trends. Journal of Energy Storage, 52, 104664.
- NASA PCoE. (2024). Li-ion battery aging datasets. NASA Ames Prognostics Center of Excellence.
- Peng, J., ve ark. (2024). State of health estimation of Li-ion battery via incremental capacity analysis and internal resistance identification based on Kolmogorov–Arnold networks. Batteries, 10(9), 315.
- Sui, X., He, S., Vilsen, S. B., Meng, J., Teodorescu, R., & Stroe, D. I. (2021). A review of non-probabilistic machine learning-based state of health estimation techniques for lithium-ion battery. Applied Energy, 300, 117346.
- Tian, J., ve ark. (2023). Deep learning framework for lithium-ion battery state of charge estimation: Recent advances and future perspectives. eTransportation, 38, 100262.
- Xu, H., ve ark. (2025). State of charge estimation for lithium-ion batteries. Processes, 13(11), 3559.

- Zhao, F., Guo, Y., & Chen, B. (2024). A review of lithium-ion battery state of charge estimation methods based on machine learning. *World Electric Vehicle Journal*, 15(4), 131.
- Zheng, M., ve ark. (2024). Joint estimation of state of charge and state of health of lithium-ion batteries via data-driven methods. *FME Transactions*.

BÖLÜM 11

İş Güvenliği İyileştirme Çalışmalarında CPM- PERT Uygulaması

Ulviye Polat¹

¹ Doç. Dr., Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü ORCID: 0000-0002-0199-9237

1.GİRİŞ

Günümüzde işletmeler, mevcut süreçlerini geliştirme ve iyileştirme çalışmalarını başarı ile yürütebilmek için çok sayıda yöntem ve araç kullanmaktadır. İyileştirme çalışmaları genellikle proje niteliğinde yürütülmektedir. Proje, rutin çalışmalardan farklı olarak özgün bir amacı, kaynak kapasitesi, beklenen süre bilgisi bulunan ve bütçe kapsamında iş adımları belirlenmiş olan çalışmalardır. İşletmelerin etkin proje yönetim süreci ve proje yönetimi sistematüğini başarılı şekilde uygulamaları kritik öneme sahiptir. Proje yönetiminde işletme kaynaklarının verimli şekilde kullanılabilmesi ve işlerin doğru olarak programlanabilmesi için ilgili sürelerin uygun olarak belirlenebilmesi ve faaliyetlerin zamanında bitirilmesi başarı ile sağlanmalıdır. Projelerin planlama ve zamanlama çalışmalarının yapılmasında Zaman Çizelgeleme, Gantt Şemaları, CPM (Critical Path Method) ve PERT (Program Evaluation and Review Technique) yöntemleri kullanılabilmektedir. Bu yöntemler arasında CPM ve PERT, ağ diyagramları ile modelleme esasına dayanmaktadır.

Ağ diyagramları bir ürünün, hizmetin veya çalışmanın en baştan en sona kadar olan her adımını görünür hale getirerek; birbirine bağlı olan işler ve birbirleri üzerindeki önceliklerini görselleştirerek göstermekte çok yararlı modellerdir. Küçük ölçekli projeler için Gantt diyagramı tekniği yeterli olabilirken, bir projede faaliyet sayısı arttıkça, faaliyetler arası ilişkilerin gösterilmesi gerekliliği ve proje yönetiminin zorlaşmasından dolayı Gantt diyagramı yetersiz kalabilir. Bu yetersizliklerin giderilmesi için Gantt diyagramına birtakım özellikler eklenerek geliştirilen ağ modelleri kullanılmaktadır (Özden ve Gül, 2020). Ağ diyagramları, birden fazla sayıda olan projelerin aynı zamanda denetimini ve planlamalarını mümkün kılması, faaliyetlerin birbirleri arasındaki ilişkilerini anlaşılır, sade bir şekilde göstermesi, diyagramlar sayesinde kontrol kolaylığı sağlaması, darboğazlar belirlenebilmesi yönünden fayda sağlamaktadır (Taha, 2020).

Proje yönetimi konusunda bilimsel ilk çalışmalar 1900'lü senelerin başlarında Frederick Taylor tarafından gerçekleştirilmiştir. Taylor, çalışmalarında iş faaliyetlerini yeniden analiz ederek, işlerin planlanmasını çok daha verimli bir hale getirmiştir. Proje yönetiminin öncülerinden birisi de Henry L. Gantt'dır. Gantt, projelerde görevlerin görsel olarak gösteren Gantt grafik tekniğini geliştirmiştir. CPM ve PERT ise, farklı alanlarda ve sektörlerde bilimsel ve saha çalışmalarında günümüzde başarılı projelerin planlanması ve yönetiminde kullanılabilmektedir.

CPM ve PERT farklı alanlarda bilimsel çalışmalar bulunmaktadır. Sarıca (2006), büyük ölçekli bir inşaat projesinde CPM ve PERT tekniklerini kullanarak planlama ve kontrol safhalarını detaylı olarak incelemiştir. Coşkun ve Ekmekçi (2011), Atatürk Havalimanı inşaatında proje adımlarını CPM, PERT ve Gantt

diyagramlarıyla zaman ve maliyet unsurları yönünden incelemiştir. Mazlum (2014) çalışmasında, klasik CPM ve PERT tekniğini bulanık sayılar ile kullanarak; klasik ve bulanık CPM, PERT sonuçlarını kıyaslamıştır. Agyei (2015), bir bina projesinde, projenin bitirilmesi için gerekli olan minimum zamanda maliyet ve süre dengesini sağlamak için CPM, PERT analiz yöntemlerini kullanmıştır. Proje kapsamında maliyetler düşürülmüş, süre hızlandırılmıştır. Gül ve ark. (2017), acil serviste hasta akışının değerlendirilmesi için klasik CPM, PERT yerine bulanık yöntemlerin kullanımı üzerine çalışmıştır. Çalışmalarında, hizmet sürecinde gecikmelerin, hasta bekleme sürelerinin ve kaynak kullanımının analiz edilmesi amaçlanmıştır. Elaiwi (2018), yat inşaatı projesinde CPM ve PERT tekniklerini uygulayarak, projenin tamamlanma süresi ve maliyet üzerindeki etkilerini analiz etmiştir. İlave olarak, hammadde dağıtımı, lojistik gibi faaliyetlerin de proje üzerindeki etkisi tartışılmıştır. Ba'Its, Puspita ve Bay (2020), büyük projelerde kullanılan standart istatistik şemaları yerine, CPM ve PERT teknikleriyle proje takvimlerinin daha doğru oluşturulmasını incelemiş, proje süre tahmininde belirsizlik olan durumlarda farklı olasılık seviyelerine göre zaman tahmini sunmasının karar vericiler için faydalı olduğunu belirtmişlerdir. Yuliarty ve Anggrain (2021), gondol yapımında karşılaşılan faaliyetlerin gecikme sorununu çözebilmek için CPM ve PERT yöntemlerini kullanmıştır. Bu şekilde bahsedilen projenin süresi 113 günden CPM tekniği ile 55, PERT ile 53 güne düşürülmüştür. Desticioğlu (2022), savunma sanayi projelerinin karmaşıklığı ve zaman belirsizliklerini dikkate alarak, CPM ve PERT yöntemleriyle proje planlaması yapmış ve proje kontrol süreçlerini incelemiştir. Cingöz ve Gürgen (2023), hızlı yiyecek sektöründe verimlilik ve zamanın kritik hale geldiğini vurgulayarak, üretim süreci adımlarını incelemiş, PERT yöntemi kullanarak süreç planlaması yaparak optimizasyon önerileri sunmuştur. Saepudin ve ark (2023), inşaat şirketi projesi kapsamında CPM ve PERT kullanarak maliyet ve süre açısından iyileştirme imkanlarını araştırmışlardır. Atlas ve Kızıl (2024), havacılık sektöründe İHA (insansız hava aracı) projelerinde, PERT analizi ile beraber hedef programlama yöntemlerini entegre ederek, projenin hem süresini hem de maliyetini optimize etmeyi araştırmıştır. Çorumlu, Atalay ve Dinler (2024), yazılım projelerindeki belirsizlikleri dikkate alan çalışmalarında klasik CPM, PERT'in yerini alacak şekilde bulanık doğrusal programlama önermiştir. Gerçek bir yazılım projesi üzerinde uygulama yapılmış; belirsizlik altında kaynak atama ve süre tahmini yapılmıştır. Bu sayede daha esnek çizelgeleme sağlanmıştır. Dinler ve Çetin (2024), savaş uçağı geliştirme projesinde; proje zamanlarının belirsizliklerini modelleyebilmek ve analiz edebilmek için bulanık mantık uygulamalarından yararlanmıştır. PERT analizinin yalnızca süre tahmininde değil, aynı zamanda risk yönetimi ve kritik faaliyet analizinde de önemli rol oynadığını ortaya konmuştur. Jouda ve Shiker (2024), konut inşaatı projesi üzerinden CPM ve PERT tekniklerinin etkililiğini karşılaştırmışlardır. Her iki yöntemin avantajları/ dezavantajları analiz edilerek,

proje sınırlamaları ve belirsizliklerin yöntem performansına etkisi değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada, kablo üretimi yapan bir firmada, mevcuttaki iş sağlığı ve güvenliği sisteminin geliştirilmesi amacıyla, yapılması planlanan çalışmalar bir iyileştirme projesi olarak değerlendirilmiştir. Proje kapsamında iyileştirme faaliyetleri belirlenmiştir. Her faaliyet için öngörülen süreler oluşturularak CPM ve PERT yöntemleri ile iyileştirme projesinin tamamlanmasının tahmini süreleri belirlenmiştir. Öncelikle CPM ile kritik yol ve projenin minimum tamamlanma süresi hesaplanmış, ardından PERT yöntemiyle çeşitli olasılıklara göre proje süresi tahmin edilmiştir. Proje süresi hem deterministik hem de stokastik yaklaşımlarla analiz edilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

Çalışmada kullanılan, CPM ve PERT yöntemleri, projelerin planlanması, çizelgelenmesi, iş adımlarının kontrolüne yönelik olarak geliştirilmiş ağ esaslı modellerdir. Genel olarak bakıldığında, projenin iş adımlarının, öncelik olarak birbirleri ile bağlantılarının sağlanması ve iş adımlarının süre bilgilerinin tanımlanması gerekir. Daha sonra proje, iş adımları (faaliyetler) arasında ilişkileri gösteren bir şebekeye dönüştürülmelidir. Son aşamada ise, projenin zaman çizelgelemesini sağlayacak ağ hesapları gerçekleştirilir (Taha, 2020). CPM'de kritik yol, projenin tamamlanma süresini doğrudan etkileyen faaliyetler dizisidir ve bu yol üzerindeki herhangi bir gecikme, tüm projenin gecikmesine neden olur. PERT ise projenin belirli bir süre içinde tamamlanma olasılığı hakkında bilgi sağlar ve belirsizlik altında karar verme süreçlerini destekler (Heizer, Render ve Munson, 2020).

2.1.CPM (Critical Path Method, Kritik Yol Yöntemi)

CPM, 1950'li yıllarda Ramington Rond firmasıyla J.E Kelly ve Dupont firmasından M.B Walker tarafından geliştirilmiştir. CPM yöntemi, yöneylem araştırması modelleri arasında faaliyet sürelerinin sabit ve önceden bilindiği varsayımıyla çözümleyen deterministik bir modeldir. Yöntemde faaliyetler arasında ilişkiler belirlenerek, ilk ve son faaliyetler arasında en uzun süre oluşturulur. En uzun yol, kritik yol olarak isimlendirilir. Kritik yol üzerinden projenin tamamlanabileceği en kısa süreye ulaşılır. Kritik yol üzerindeki, faaliyetlerde oluşabilecek gecikmeler projenin tamamlama süresini etkileyecektir. Bu nedenle, kritik yol üzerindeki faaliyetlere ayrı bir önem verilmesi gereklidir (Gido ve Clements, 2015). CPM uygulanan kritik yol, boş zamana sahip olmayan faaliyetler grubu olarak da ifade edilebilir. Zaman yönüyle kritik olan projelerde, hızlandırma yöntemleri ile proje süreleri kısaltılabilir (Kerzner, 2017).

CPM, faaliyet sürelerinin olduğu projelerde kullanılan bir yöntemdir. Her faaliyet için sabit bir süre varsayılır ve projenin tamamlanma süresi, faaliyetler arasındaki bağımlılıklara göre hesaplanır. Bu yöntem, özellikle **zaman ve maliyet ilişkisinin net olduğu mühendislik ve inşaat projeleri gibi alanlarda** tercih edilmektedir (Gido ve Clements, 2015).

CPM yöntemi uygulanırken aşağıdaki adımların sırasıyla izlenir:

- Projedeki faaliyetler ve faaliyetler arasındaki ilişkiler belirlenir.
- Her faaliyetin süresi belirlenir.
- Ağ diyagramı oluşturulur.
- Erken başlama (ES), geç başlama (LS), erken bitiş (EF), geç bitiş (LF) zamanları belirlenir.
- Her faaliyet için toplam gecikme süreleri (bolluklar) hesaplanır.
- Kritik yol belirlenir (Taha, 2020).

Ağ diyagramı oluşturulurken aşağıdaki kurallara dikkat edilmesi gereklidir:

- Her faaliyet bir ok ile gösterilir. Düğümlemler ise daire şeklinde gösterilir. Her faaliyet iki ayrı düğümlerle (başlangıç ve bitiş) tanımlanır.
- Faaliyetlere veya düğümlere birer numara verilmelidir. Faaliyetler numaralar ile de söylenebilir veya başlangıç bitiş düğümleri ile de söylenebilir.
- Yeni bir faaliyet eklenirken, ağa eklenecek faaliyetten hemen önce hangi faaliyetin eklenmesi zorunluluğu, eklenecek faaliyeti hangi faaliyetlerin izlemesi zorunluluğu ve eklenecek faaliyetle eş zamanlı olarak hangi faaliyetlerin bulunması gerekliliği gözden geçirilmelidir.
- Bir düğüme birden fazla faaliyet bağlanabilmektedir. Ardışık iki düğüm en fazla bir adet faaliyet ile birbirine bağlanmaktadır. Ard arda gelen iki düğümlerde maksimum bir tane faaliyet birlikte bağlanabilir. İki farklı faaliyetin başlangıç ve bitiş düğüm noktaları aynı yerde olamaz. Bu tip bir durumda karşılaşılmaması için kukla faaliyetler kullanılır. Kukla faaliyet, projedeki faaliyetlerin arasındaki durumlar için gerekli ancak zaman ve kaynak harcamadan gerçekleştirilebilen gerçek olmayan faaliyet olarak tanımlanır (Taha, 2020).

CPM yöntemi ile projenin tamamlanma süresi, her bir faaliyetin başlayabileceği en erken süre, kritik faaliyetler, projenin en kısa zamanda tamamlanması için her bir faaliyetin en geç ne zaman bitirilmesi bilgisi, kritik olmayan faaliyetlerde en geç tamamlanma süresi bilgileri elde edilebilir.

2.1.1. CPM Yönteminde Faaliyet Süreleri

Faaliyetlerin En Erken Başlama Zamanı (ES):

Projede yer alan bir faaliyetin başlayabileceği mümkün olan en erken zamanı ifade eder. Bir faaliyetin süresi hesaplanırken, ona bağlı birden fazla faaliyet varsa, her bir faaliyet için ayrı ayrı hesaplama yapılır ve ortaya çıkan en yüksek değer seçilir. Bir faaliyetin en erken başlama zamanı aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$ES_j = \max (ES_i + t_{ij}) \quad (1)$$

ES_j , faaliyetin en erken başlama zamanını, ES_i , süresi hesaplanan faaliyetten önceki faaliyetin (ya da faaliyetlerin) en erken başlama zamanını, t_{ij} ise i ile j olaylarını bağlayan faaliyetin süresini göstermektedir. Başlangıç faaliyetinin en erken başlama zamanı 0 olmaktadır ($ES_1=0$).

Faaliyetlerin En Erken Bitiş Zamanı (EF):

Bir faaliyetin tamamlanabileceği en erken süreyi göstermektedir. En erken bitirme süresi, faaliyet süresi ile en erken başlama süresinin toplanması ile elde edilir:

$$EF_i = ES_i + t_{ij} \quad (2)$$

Faaliyetlerin En Geç Bitiş Zamanı (LF):

Faaliyetin projeyi geciktirmeden bitebileceği en geç zamanı göstermektedir. Hesaplanan faaliyete bağlı birden fazla faaliyet varsa, ES hesaplamasında olduğu gibi, her bir faaliyet için ayrı ayrı hesaplama yapılır, ancak bu sefer ortaya çıkan değerlerden en küçük olan değer seçilir. LF aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$LF_i = \min (LF_j - t_{ij}) \quad (3)$$

Faaliyetlerin En Geç Başlama Zamanı (LS):

Faaliyetin projeyi geciktirmeden başlayabileceği en geç zamanı ifade etmektedir. En geç başlama süresi, her bir faaliyetin en geç bitiş süresinden faaliyet süresinin çıkarılmasıyla elde edilir. LS aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$LS_i = LF_j - t_{ij}, \quad (4)$$

Kritik yol, tamamlanma zamanı açısından en uzun değere sahip olan ve toplam boşluk değerinin sıfır olduğu faaliyetlerdir. Kritik yoldaki faaliyetlerin süreleri toplamı da, projenin tamamlanma süresini verir. Kritik yolu oluşturan faaliyetlerden herhangi birinin geç tamamlanması, projenin de geç tamamlanması anlamına gelir. Kritik yolda yer alan faaliyetlerin en erken ve en geç başlama zamanları ile en erken ve en geç bitiş zamanları birbirine eşittir. Yani faaliyetlerin bolluk değerleri sıfırdır. Dolayısıyla kritik yolun üzerindeki faaliyetler daha fazla dikkat etmeyi gerektiren faaliyetlerdir.

Kritik yolda aşağıda belirtilen ifadelerin sağlanması gereklidir.

$$ES = LS \quad (5)$$

$$EF = LF \quad (6)$$

$$EF - ES = LF - LS = t \quad (7)$$

Kritik yol belirlenirken öncelikle faaliyetlerin erken başlama ve erken bitiş zamanları hesaplanır. Bu aşamaya ileriye doğru hesaplama aşaması denir. İleriye doğru hesaplama yaparken aşağıda belirtilen kurallara dikkat etmek gereklidir:

- Öncülü olmayan her bir faaliyetin en erken başlama zamanı sıfırdır.
- Öncülü olan faaliyetlerin en erken başlama zamanı, tüm öncül faaliyetlerinin en erken bitiş zamanlarının maksimum değerine eşittir. Yani; $ES_i = \max (EF(i\text{'nin tüm öncül faaliyetleri}))$ 'dir.
- Bir faaliyetin en erken tamamlanma zamanı, en erken başlama zamanıyla faaliyet süresinin toplamına eşittir. Yani; $EF_i = ES_i + \text{Faaliyet süresi}$ 'dir.
- En son faaliyetin en erken tamamlanma süresi proje tamamlanma süresini verir.

İkinci aşamada ise en geç başlama ve en geç bitiş zamanları hesaplanır. Bu aşamaya da geriye doğru hesaplama aşaması denir. Projenin toplam süresinden en son faaliyetin süresi çıkartılarak bu faaliyetin en geç başlama zamanı bulunur. Eğer bir olay birkaç faaliyetin bitiminde yer alıyorsa, bu durumda bu faaliyetlerden en az süreye sahip olanı dikkate alınarak, hesaplamaya devam edilir.

Faaliyetlerin en geç başlama zamanları; $LS_i = LF_i - \text{Faaliyet süresi}$ 'dir.

İleriye ve geriye hesaplamalarla her faaliyetin ES, EF, LS, LF değerleri ve kritik yol bulunduktan sonra projenin tamamlanma sürecine de etki edebilecek olan bolluk değerleri hesaplanır (Özden ve Gül, 2020).

2.2.PERT (Proje Değerlendirme ve Gözden Geçirme Tekniği)

PERT, 1950'li yıllarda Amerikan Deniz Kuvvetleriyle, Booz ve Ailen ve Hamilton isimli danışmanlık şirketlerinin Polaris Denizaltı Füze Projesi (Polaris Missile Project) kapsamında gerçekleştirdikleri çalışmalar sonucu PERT ortaya çıkmıştır.

PERT, faaliyet sürelerinin belirsiz olduğu durumlarda etkin proje yönetimi çalışmaları için kullanılabilir. Başlangıçta faaliyet süreleri ile ilgili tahminleme yapılamamaktadır. Bu amaçla tahminsel zamanlar kullanılır. PERT tekniğinin amacı, her faaliyete ilişkin ortalama süre ve varyans değerleri bulunarak faaliyet sürelerinin olasılık dağılımını belirlemek ve bu şekilde belirsizliklerle başa çıkmaya çalışmaktır. Proje süre tahmininde belirsizliğin önemli bir rol

oynamasından dolayı, PERT yöntemi, optimistik, kötümser ve en olası tahmin değerlerinin kullanılmasıyla beklenen süre hesaplamalarında tercih edilmektedir (Dinler ve Çetin, 2024).

Sürelerin tahminleri saha yöneticileri gibi uzman görüşü alınarak belirlenebilir. PERT yönteminde faaliyet süreleri üç farklı tahminle tanımlanır:

İyimser süre (a): En hızlı tamamlanma süresidir. Projede söz konusu faaliyet için bütün koşulların en iyi şekilde gerçekleşmesi ve faaliyetin sorunsuz bir şekilde yürütülmesi durumunda, faaliyetin tamamlanabileceği en kısa süredir. Bu noktada bir faaliyetin süresinin en iyimser süreden daha kısa sürede olmasının olasılığının %'1den büyük olmadığı düşünülmektedir.

Kötümser süre (b): En yavaş tamamlanma süresidir. Projede söz konusu faaliyet için, hava şartları, kazalar, malzeme tarihlerinde gecikme gibi işlerin ters gitmesi ve bütün koşulların en kötü şekilde gerçekleşmesi durumunda, faaliyetin tamamlanabileceği en uzun süredir. Kötümser süre tahmini faaliyetin bütün beklenen gecikmelerin ve aksaklıkların bulunduğu bir ortamın olduğunu kabul eder. Bu şartların olabilme ihtimali yüzde 1 olarak belirlenmiştir

En olası süre (m): Gerçekleşmesi en muhtemel süredir. Faaliyetin gerçekleşme olasılığının en yüksek olduğu en gerçekçi süredir. Başka bir anlatımla faaliyetin normal koşullar altında gerçekleşme süresidir. Olası sürenin projeye ilgili planlanan her faktörün normal şartlar dahilinde gerçekleştiği olaylarda ve o faaliyetin önceden belirlenmiş deneyimlere de dayanarak beklenen ve faaliyetin tamamlanabileceği en beklenen sürede gerçekleşmesidir. Burada “a” ve “b”, ilgili faaliyetin tamamlanma süresine ilişkin dağılımın alt ve üst sınırlarını, “m” ise Beta dağılımının mod değerini göstermektedir (Özden ve Gül, 2020).

PERT analizinde hesaplanan süreler kesin olmadığı için bu değerler beklenen değerler şeklinde tanımlanır. Söz konusu süreler kesin olmadığı için bu sürelerden bir sapma olması söz konusu olur. Bu durumda her faaliyet için sapma değeri ve varyans hesabı yapılır.

Bu üç değer, beta dağılımı varsayımıyla kullanılarak, her faaliyetin beklenen süresi (t_e) hesaplanır (Heizer, Render ve Munson, 2020):

$$t_e = (a + 4m + b) / 6 \quad (8)$$

Ayrıca, faaliyet süresine ilişkin varyans şu formülle hesaplanır:

$$\sigma^2 = [(b - a) / 6]^2 \quad (9)$$

PERT tekniğinde birden fazla kritik yol olduğu takdirde varyansı büyük olan yol kritik yol olarak seçilir. Varyans değer aralığı ne kadar genişlerse belirsizlik o kadar artacaktır. Eğer beklenen süreden daha erken tamamlanması isteniliyorsa en küçük varyans hesaba katılarak hesaplamalar yapılır.

Faaliyetlerin bolluk durumları, projedeki bir faaliyetin projenin termin tarihini etkilemeden geciktirilebileceği maksimum aralıktaki değerlerdir. En çok kullanılan bolluk türleri toplam bolluk ve serbest bolluktur. Toplam bolluk, bir faaliyetin projenin termin süresini değiştirmeden geciktirilebileceği en uzun süreyi ifade eder. Ağ diyagramında her faaliyetin erken ve geç başlama süreleri arasındaki farka eşittir. $TB=GB-EB$ şeklinde hesaplanmaktadır.

Serbest bolluk projedeki faaliyetlerin kendisinden sonra olan faaliyetin erken başlama süresine etki etmeyecek şekilde hesaplanan en uzun süredir. Bir faaliyetin birden fazla faaliyete bağlandığı noktalarda erken başlama zamanı olarak en erkeni hesaplama alınır. Serbest bolluk her daim toplam bolluktan küçük ya da eşit olmak zorundadır (Özden ve Gül, 2020).

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, kablo üretimi yapan bir firmada, mevcut iş güvenliği sisteminin geliştirilmesi ve kontrol edilmesi uygulamaları bir iyileştirme projesi olarak değerlendirilmiştir. Proje kapsamında öncelikli olarak iyileştirme adımları belirlenmiştir. Her adım için öngörülen süreler oluşturularak CPM ve PERT yöntemleri ile iyileştirme projesinin tahmini süreleri belirlenmiştir. Öngörülen sürelerin azaltılabilmesi için iyileştirme önerileri oluşturulmuştur.

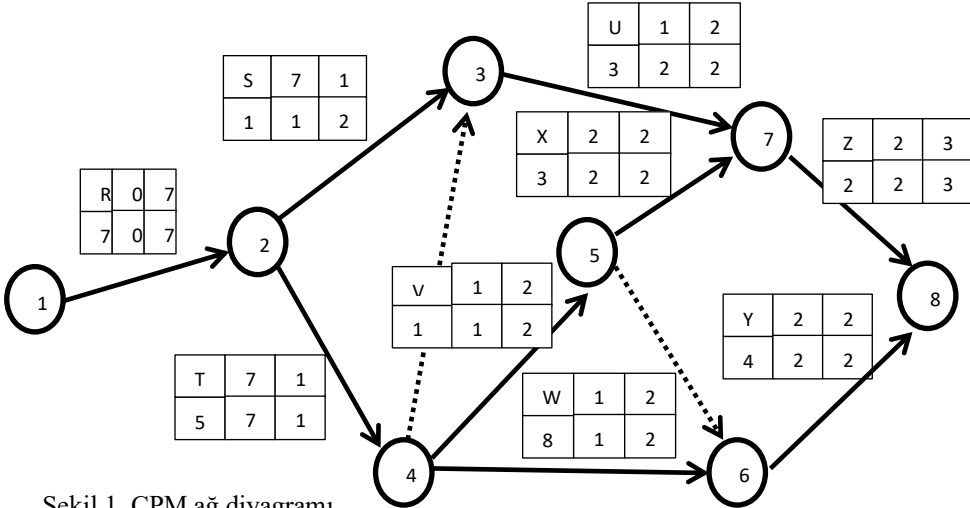
İş güvenliği iyileştirme projesinde toplam 9 adet yapılması gerekli olan iş faaliyeti belirlenmiştir. Bu faaliyetler risk değerlendirme çalışmasının yenilenmesi, acil risklerle ilgili önlem alınması, eksik eğitimlerin tamamlanması, acil durum planının gözden geçirilmesi, yangın güvenliği konusunda eksikliklerin tamamlanması, makine ve ekipmanların bakım kontrolü, uyarı levhaları ve talimatların kontrolü, KKD iyileştirme çalışması ve saha denetimlerinin yapılmasıdır. Faaliyetler işveren temsilcisi, iş güvenliği uzmanı, iş yeri hekimi ve çalışan temsilcilerinin yer aldığı iş sağlığı ve güvenliği ekibi tarafından belirlenmiştir.

Faaliyetler, öncelikli faaliyetler ve hedeflenen süreler, ekip üyeleri tarafından belirlenerek Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. İş güvenliği iyileştirme projesi faaliyet bilgileri

Faaliyet Kodu	Faaliyet Adı	Öncelikli Faaliyet Kodu	Süre (Gün)
R	Risk değerlendirme çalışmasının yenilenmesi	-	7
S	Acil risklerle ilgili önlem alınması	R	10
T	Eksik eğitimlerin tamamlanması	R	5
U	Acil durum planının gözden geçirilmesi	S,T	3
V	Yangın güvenliği konusunda eksikliklerin tamamlanması	T	12
W	Makine ve ekipmanların bakım kontrolü	T	8
X	Uyarı levhaları ve talimatların kontrolü	V	3
Y	KKD iyileştirme çalışması	V	4
Z	Saha denetimlerinin yapılması	U, X, Y	2

Faaliyetler ve öncelikli faaliyetler göz önünde bulundurularak hazırlanan ağ diyagramı Şekil 1’de gösterilmektedir.



Şekil 1’deki ağ diyagramının görsel gösteriminde

a	b	c
d	e	f

a faaliyet kodunu, b erken başlama süresini c erken tamamlama süresini, d faaliyet süresini, e geç başlama süresini, f geç tamamlama süresini göstermektedir. Faaliyetler ile ilgili süreleri Tablo 2’de gösterilmektedir.

Tablo 2. Faaliyet süre bilgileri

Faaliyet Kodu	Öncelikli Faaliyet Kodu	Süre (Gün)	EB	ET	GB	GT	Boşluk
R	-	7	0	7	0	7	0
S	R	10	7	17	15	25	8
T	R	5	7	12	7	12	0
U	S,T	3	17	20	25	28	8
V	T	12	12	24	12	24	0
W	T	8	12	20	16	24	4
X	V	3	24	27	25	28	1
Y	V	4	24	28	24	28	0
Z	U, X, Y	2	28	30	28	30	0

Tablo 2’den de görüldüğü üzere bolluk değeri 0 olan faaliyetler kritik yolda yer alan faaliyetleri göstermektedir. Bu doğrultuda kritik yol R-T-V-Y-Z olarak bulunmuştur. Projenin tamamlama süresi 30 gün olarak bulunmuştur.

Çalışma grubu tarafından, projenin farklı tamamlanma zamanlarının gerçekleştirilme olasılıkları araştırılmak istenmiş ve PERT yöntemi uygulanmıştır. Faaliyetlerin planlanan günleri için en kötü, en iyi ve muhtemel bitirme süreleri uzlaşılarak belirlenmiştir. Belirlenen değerler, bu değerlerin beklenen süreleri ve standart sapma bilgileri Tablo 3’de gösterilmektedir.

Tablo 3. Faaliyetlerin PERT süre hesaplamaları

Faaliyet No	Öncelikli Faaliyet No	Süre Tahminleri (gün)			t_e (beklenen süre)	σ (standart sapma)
		İyimser (a)	Olası (m)	Kötümser (b)		
R	-	5	7	9	7	0.667
S	R	7	10	12	9.833	0.833
T	R	3	5	6	4.833	0.500
U	S,T	2	3	5	3.167	0.500
V	T	8	12	15	11.833	1.167
W	T	4	8	10	7.667	1.000
X	V	2	3	5	3.167	0.500
Y	V	3	4	5	4	0.333
Z	U, X, Y	1	2	4	2.167	0.500

Beklenen süreler kullanılarak faaliyetlerin erken tamamlanma süreleri yeniden hesaplandığında projenin tamamlanma süresi 29.833 gün olarak bulunmuştur. Kritik yolda yer alan faaliyetlerin varyansları toplamının $(0.445+0.250+1.361+0.111+0.250)$ karakökü hesaplanarak standart sapma değeri ise 1.555 olarak elde edilmiştir. PERT uygulaması sonucu elde edilen faaliyet süre bilgileri Tablo 4’de gösterilmektedir.

Tablo 4. PERT faaliyet süre bilgileri

Faaliyet No	Öncelikli Faaliyet Kodu	Süre (Gün)	EB	ET
R	-	7	0	7
S	R	10	7	16.833
T	R	5	7	11.833
U	S,T	3	16.833	19.833
V	T	12	11.833	23.666
W	T	8	11.833	19.500
X	V	3	23.666	26.833
Y	V	4	23.666	27.666
Z	U, X, Y	2	27.666	29.833

İstenilen projenin gün bazında tamamlanma olasılıkları normal dağılım kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 5’de gösterilmektedir.

Tablo 5. Projenin farklı sürelerde tamamlanma olasılıkları

Gün	Z Değeri	Tamamlanma Olasılığı (%)	Gün	Z Değeri	Tamamlanma Olasılığı (%)
20	-6.33	0.00	30	0.11	54.3
25	-3.11	0.09	31	0.75	77.3
26	-2.47	0.68	32	1.40	91.8
27	-1.83	3.3	33	2.04	97.9
28	-1.18	11.9	34	2.68	99.6
29	-0.54	29.4	35	3.33	99.96

4.SONUÇ VE ÖNERİLER

İş güvenliği iyileştirme projesi içerisinde 9 faaliyetten 4 adedi kritik olmayan faaliyettir. 5 adet faaliyet kritik yol oluşturmuştur. Kritik yolu oluşturan faaliyetler risk değerlendirme çalışmasının yenilenmesi, eksik eğitimlerin tamamlanması, yangın güvenliği konusunda eksikliklerin tamamlanması, KKD iyileştirme çalışması, saha denetimlerinin yapılması faaliyetlerine personel, zaman ve bütçe ayrımları gözden geçirilerek bu çalışmaların zamanında tamamlanması olası bir gecikmenin önlenmesini sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Agyei, W. (2015). Project planning and scheduling using PERT and CPM techniques with linear programming: Case study. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 4(8), 222-227.
- Atlas, M. ve Kızıl, F. (2024). İnsansız Hava Aracı (İHA) Üretim Program Değerlendirme ve Gözden Geçirme Tekniği (PERT) ve Hedef Programlama ile Planlanması. *Anadolu Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 25(1), 560-586.
- Ba'Its, H. A., Puspita, I. A., & Bay, A. F. (2020). Combination of Program Evaluation and Review Technique (PERT) and Critical Path Method (CPM) for project schedule development. *International Journal of Integrated Engineering*, 12(5), 86-92.
- Cingöz, K., & Gürgen, E. (2023). Hızlı Yiyecek Sektöründe Üretim Sürecinin Planlanması: PERT Yöntemi Uygulaması Tarsus Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Fakültesi Dergisi, 3(1), 36-46.
- Coşkun, O., & Ekmekçi, İ. (2011). Bir İnşaat Projesinin Evreleri İle Zaman Ve Maliyet Analizinin Proje Yönetim Teknikleri Vasıtasıyla İncelenmesi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(20), 39-53.
- Çetin, A. A., & Dinler, E. (2024). Savaş Uçağı Geliştirme Projesinde Test ve Üretim Aktivitelerine Bağlı Proje Süresi Tahmini. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 36(1), 11-22.
- Çorumlu, V., Atalay, K. D., & Dinler, E. (2024). Proje çizelgelemede bulanık doğrusal programlama ile yeni bir yöntem önerisi: Yazılım projesinde uygulama. *Journal of Turkish Operations Management*, 8(1), 20-38.
- Desticioğlu, B. (2022). Project Planning With CPM and PERT Methods: Example of Defence Industry. *Journal of Naval Sciences and Engineering*, 18(2), 363-385.
- Elaiwi, A. H. (2018). Efficiency of Critical Path Method (CPM) and PERT technique for yacht construction. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 9(11), 65-73.
- Gido, J., & Clements, J. P. (2015). Successful project management (6th ed.). Cengage Learning.
- Gül, M., Güneri, A. F., & Güneş, G. (2017). Project management in healthcare: A case study for patient flow evaluation in an emergency room using fuzzy CPM and fuzzy PERT. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 35(4), 833-846.
- Jouda, M. A., & Shiker, M. A. K. (2024). Comparing the effectiveness of PERT and CPM techniques in a house construction project: A case study. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 57(1), 79-85.

- Heizer, J., Render, B., & Munson, C. (2020). Operations management (13th ed.). Pearson.
- Hillier, F.S. & Lieberman, G. J. (2019). Yöneylem Araştırmasına Giriş- Cilt- I (10. Basımdan Çeviri). Nobel Yayıncılık.
- Kerzner, H. (2017). Project management: A systems approach to planning, scheduling, and controlling (12th ed.). Wiley.
- Mazlum, M. (2014). *CPM, PERT ve Bulanık Mantık Teknikleriyle Proje Yönetimi ve Bir İşletmede Uygulanması*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Özden, K., & Gül, S. (2020). Yöneylem Araştırması-II (QM Yazılım Uygulamaları İle Temel Konular). Nobel Yayıncılık.
- Saepudin, T. H., Turseno, A., Panudju, A. T., Masrida, R., & Ramadhan, R. (2023). Optimization of cluster house construction using Critical Path Method (CPM) and Evaluation and Review Technique (PERT) program at PT. XYZ. *Siber International Journal of Education Technology*, 1(2), 1–8.
- Sarıca, İ. (2006). CPM ve PERT teknikleriyle proje planlama ve bir işletmede uygulanması. Yüksek lisans tezi, Uludağ Üniversitesi.
- Yuliarty, P., S, N. N., & Anggrain, R. (2021). Construction service project scheduling analysis using critical path method (CPM), project evaluation and review technique (PERT). *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 6(2), 477-480.
- Taha, H.A. (2020). *Yöneylem Araştırması (6.Basımdan Çeviri)*. Literatür Yayıncılık.

BÖLÜM 12

GaN Tabanlı Dört Anahtarlı Buck-Boost Dönüştürücünün Verim ve Genel Davranışı Üzerinde Anahtarlama Frekansının Etkisi

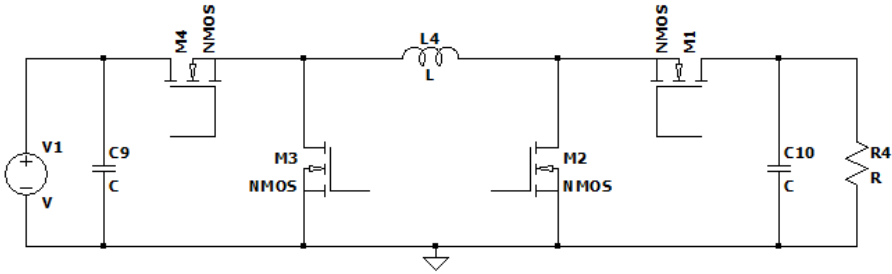
Buğra Er¹ & Okan Bingöl²

¹ Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye, Orcid: 0000-0002-3982-5654

² Prof. Dr., Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye, Orcid: 0000-0001-9817-7266

Giriş

Dört anahtarlı senkron buck-boost dönüştürücüler, geniş giriş gerilimi aralığına sahip uygulamalarda yüksek verim, düşük dalgalanma ve hızlı dinamik tepki sunmaları nedeniyle güncel güç elektroniği tasarımlarında giderek daha fazla tercih edilmektedir [1], [2]. Özellikle 12–24 V otomotiv besleme hatları, yenilenebilir enerji sistemleri, LED sürücüler ve batarya destekli taşınabilir cihazlar gibi güç dönüştürme uygulamaları, hem step-down hem de step-up modlarının aynı devre üzerinde sorunsuz şekilde yönetilmesini gerektirmektedir. Bu gereksinim, dört anahtarlı non-inverting buck-boost topolojisini geleneksel buck, boost ve SEPIC/Cuk yapıları göre daha avantajlı hâle getirmektedir [3]. Bu topoloji, bobin yapısı ve geniş çalışma alanı sayesinde hem yüksek verimlilik hem de hızlı geçici rejim davranışı sağlayabilmektedir [4]. Şekil 1’de Dört anahtarlı buck–boost dönüştürücünün güç katı topolojisi verilmiştir. Son yıllarda geniş bant aralıklı yarıiletken malzeme teknolojilerindeki gelişmeler, özellikle GaN tabanlı güç transistörlerinin anahtarlama hızını, verimini ve güç yoğunluğunu önemli ölçüde artırmıştır [5].



Şekil 1. Dört anahtarlı buck–boost dönüştürücünün güç katı topolojisi

Si ve GaN yarı iletkenler karşılaştırıldığında anahtarlama frekansı gibi birçok farklılık bulunmaktadır [6]. Anahtarlama frekansı, hem dönüştürücü verimi hem de dinamik cevap karakteristikleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Frekans arttıkça bobin ve kapasitör değerlerinin küçülmesi, akım dalgalanmalarının azalması ve kontrol bant genişliğinin iyileşmesi mümkün olmaktadır [7]. Bu nedenle yüksek hızlı GaN anahtarlama elemanı performans potansiyelinin değerlendirilebilmesi için, farklı anahtarlama frekanslarında hem kararlı durum davranışının hem de yük geçişleri gibi dinamik olayların ayrıntılı şekilde incelenmesi gerekmektedir.

Bu çalışma, dört anahtarlı non-inverting buck-boost dönüştürücülerde anahtarlama frekansının GaN ve silikon tabanlı güç elemanları üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemek amacıyla yapılandırılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde, ilgili literatür ayrıntılı biçimde değerlendirilerek buck-boost mimarilerinin gelişimi, GaN teknolojisinin yükselişi ve mevcut karşılaştırmalı

çalışmaların sınırlılıkları ele alınmıştır. Üçüncü bölümde, LTspice ortamında gerçekleştirilen simülasyon altyapısı tanıtılmıştır. Dördüncü bölümde, farklı anahtarlama frekanslarında iki teknolojinin verim, akım dalgalanması, geçici rejim davranışı ve gerilim stresleri açısından gösterdiği performans karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Beşinci bölümde ise çalışmanın genel sonuçları değerlendirilerek GaN tabanlı dört anahtarlı buck-boost dönüştürücülerin yüksek frekanslı uygulamalar için sunduğu avantajlar vurgulanmış ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

Dört Anahtarlı Buck–Boost Dönüştürücü Yapısı ve Çalışma İlkeleri

Bu çalışma kapsamında dört anahtarlı non-inverting buck–boost dönüştürücünün GaN ve silikon tabanlı güç anahtarlarıyla farklı anahtarlama frekanslarında gösterdiği performans LTspice ortamında ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Çalışmada kullanılan senkron buck–boost mimarisi, SW1–SW4 anahtar grubundan oluşmakta ve bobin üzerinden anahtarlama yapılarak çıkış gerilim oluşturulmaktadır. Kontrol sinyalleri, LT8390A entegresinin ayrıntılı SPICE modeli üzerinden üretilmiş ve bu sayede dead-time süreleri, MOSFET geçiş davranışları ve geri besleme dinamiği gerçek donanım karakteristiğine uygun biçimde simülasyon ortamına aktarılmıştır. Dönüştürücünün LTspice devre modeli Şekil 2’de gösterilmektedir.

Dört anahtarlı buck–boost mimarisinin akım sürekliliği, mod geçişi ve verimlilik özellikleri üzerine yapılan çeşitli çalışmalar, bu topolojinin geniş giriş aralığına sahip uygulamalarda önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir [8]. PWM tabanlı, peak current mode ve ripple-based kontrol yaklaşımlarının karşılaştırıldığı araştırmalar ise kontrol bant genişliğinin geçici rejim yanıtı ve kararlılık üzerindeki belirleyici etkisine dikkat çekmektedir [2].

GaN tabanlı güç anahtarlarının bu yapıdaki performansı üzerine yapılan analizler, yüksek frekanslarda sağlanan düşük anahtarlama kaybı ve hızlı geçiş özelliklerinin sistem verimini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir [9]. Çift yönlü buck–boost yapılarında yapılan karşılaştırmalar, GaN cihazların toplam kayıplar, RMS indüktör akımı ve termal davranış açısından silikon anahtarlara göre daha üstün sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur [6], [9]. Ayrıca GaN elemanlarının yüksek dv/dt değerleri, sürücü devresi ve PCB tasarımında daha hassas bir yaklaşım gerektirse de, hızlı geçiş davranışları sayesinde yüksek frekanslı uygulamalarda önemli avantaj sağlamaktadır [10].

Anahtarlama frekansı yükseldikçe GaN ve silikon cihazlar arasındaki performans farkı daha belirgin hâle gelmektedir. Düşük frekanslarda verim değerleri birbirine yakın olsa da, silikon MOSFET’lerde parasitik kapasitans ve ters toparlanma etkileri nedeniyle toplam kayıplar hızla artmakta; buna karşılık GaN cihazlar düşük gate yükü ve düşük kapasitanstan kaynaklanan hızlı

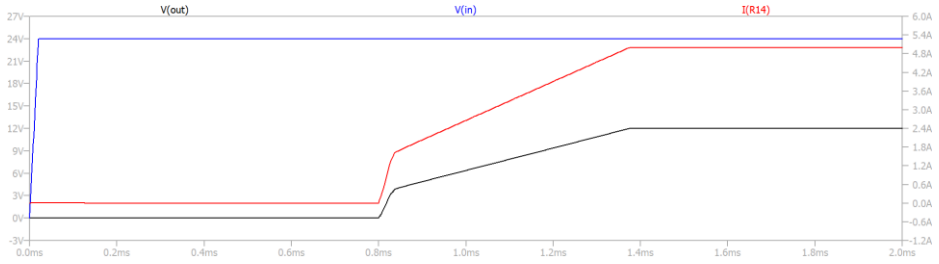
anahtarlama avantajını korumaktadır [5], [11]. Bu nedenle GaN tabanlı anahtarlar, özellikle 200 kHz–2 MHz aralığında çalışan modern buck–boost dönüştürücülerde giderek daha fazla tercih edilmektedir [6].

Şekil 2. LT8390A tabanlı senkron buck–boost dönüştürücünün LTspice devre modeli

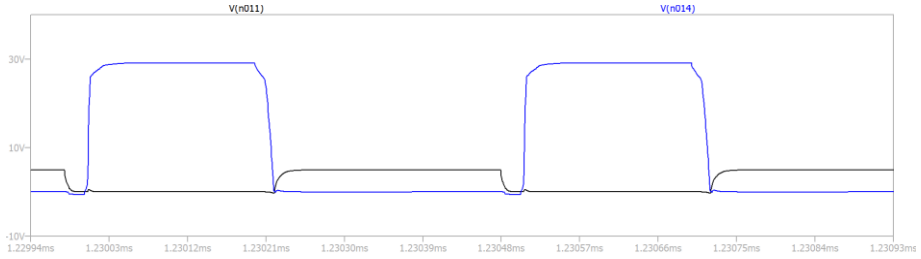
Dört anahtarlı yapıda MOSFET geçiş bölgelerinde oluşan dead-time aralığı, özellikle GaN tabanlı anahtarlama elemanları çalışma bütünlüğü ve verimlilik açısından önemlidir. Dead-time süresi boyunca akım, MOSFET'in gövde diyodu üzerinden akma eğilimindedir. GaN anahtarlama elemanlarında gövde diyodu bulunmadığından bu akım, yapay bir paralel diyot üzerinden yönlendirilir. Bu diyotlar, MOSFET'in parasitik diyodunun ilettime girmesini önleyerek hem ters

toparlanma akımlarını ortadan kaldırır hem de geçiş sırasında oluşabilecek gerilim düzensizliklerini azaltır. Çalışmada kullanılan RB068M-60 diyodu, düşük ileri gerilim düşümü ve hızlı anahtarlama karakteri sayesinde GaN anahtarlama elemanlarında uyumlu bir iletim yolu sağlamış ve yüksek frekanslı buck–boost yapısında geçiş davranışının kararlı tutulmasına katkı sağlamıştır.

Buck modu, giriş geriliminin çıkış geriliminden yüksek olduğu çalışma bölgesidir. Bu modda enerji transferi, giriş bacağındaki üst anahtarın (Q1) aktif kontrolüyle sağlanırken alt anahtar (Q2) diyot benzeri bir rol üstlenir. Çıkış bacağına ise alt anahtar (Q3) sürekli iletimdedir, üst anahtar (Q4) yalıtımda kalarak çıkış tarafında akımın kesintiye uğramamasını sağlar. Buck moduna ilişkin 2 MHz ile sürülür iken giriş gerilimi, çıkış gerilimi ve çıkış akım grafiği Şekil 3’de sunulmuştur. Şekil 4’te buck modunda MOSFET kapı gerilimleri sunulmuştur. Mavi eğri high-side, siyah eğri low-side MOSFET’e karşılık gelmektedir.

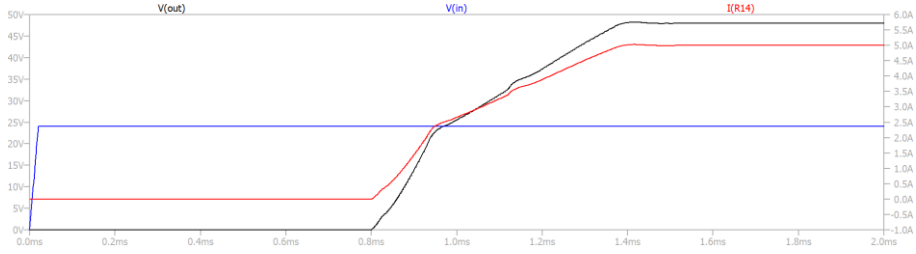


Şekil 3. 12V Output 5A çıkış 60W GaN Buck Modu 2MHz

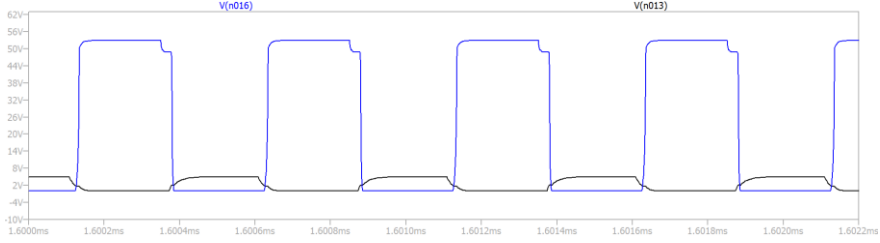


Şekil 4. 12V Output 5A çıkış 60W GaN Buck Modu 2MHz

Boost modu, çıkış geriliminin girişten yüksek olduğu bölgede devreye girer ve dört anahtarlı topolojide güç aktarımının giriş bacağından çıkışa zorlanarak gerçekleştirildiği çalışma fazıdır. Bu modda giriş bacağındaki alt anahtar (Q2) aktif kontrol altındadır, üst anahtar (Q1) yalıtımda kalır. Çıkış bacağına ise üst anahtar (Q4) anahtarlama sinyalini alırken alt anahtar (Q3) kesime girerek enerji aktarımının çıkış tarafına yönlendirilmesini sağlar. Boost moduna ilişkin 2 MHz ile sürülür iken giriş gerilimi, çıkış gerilimi ve çıkış akım grafiği Şekil 5’da sunulmuştur. Şekil 6’da boost modunda MOSFET kapı gerilimleri verilmiştir. Mavi eğri high-side, siyah eğri low-side anahtarı temsil etmektedir.

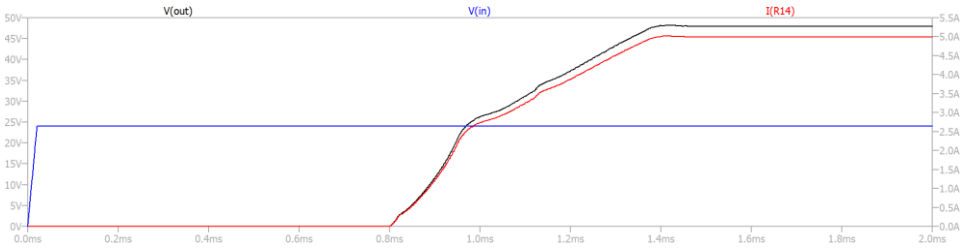


Şekil 5. 48Voutput 5A çıkış 240W GaN Boost Modu 2MHz

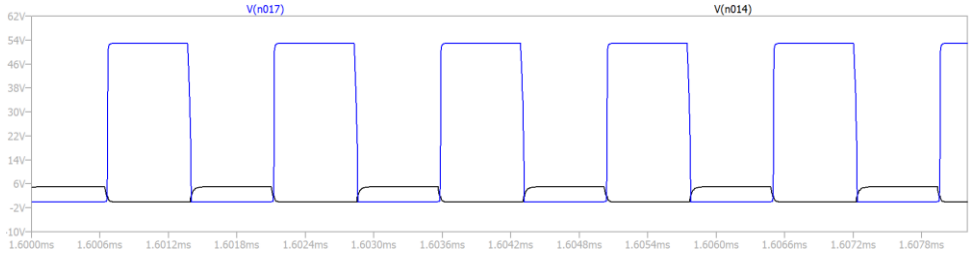


Şekil 6. 48Voutput 5A çıkış 240W GaN Boost Modu 2MHz

Anahtarlama frekansının 2 MHz'ten 685 kHz'e düşürülmesi, hem boost hem de buck çalışma bölgelerinde MOSFET kapı gerilimlerinin biçimini, indüktör akımının salınım karakterini ve geçiş rejimi yanıtını doğrudan etkilemektedir. Boost moduna ilişkin 685 kHz ile sürülür iken giriş gerilimi, çıkış gerilimi ve çıkış akım grafiği Şekil 7'de sunulmuştur. Şekil 8'de, boost modunda GaN MOSFET kapı gerilimlerinin 685 kHz frekansta aldığı biçim gösterilmektedir. Mavi eğri yüksek taraf (high-side), siyah eğri düşük taraf (low-side) anahtarı temsil etmektedir.

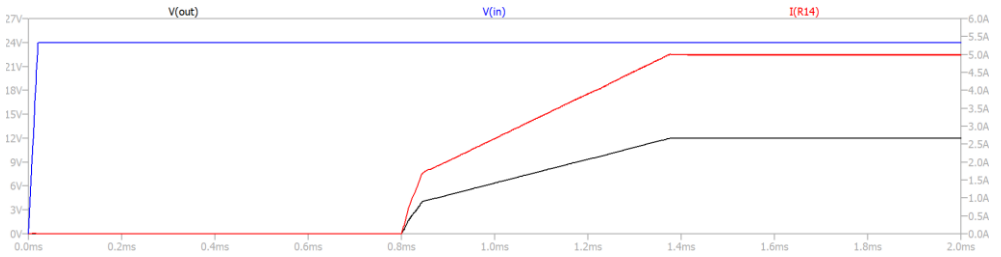


Şekil 7. 48Voutput 5A çıkış 240W GaN Boost Modu 685KHz

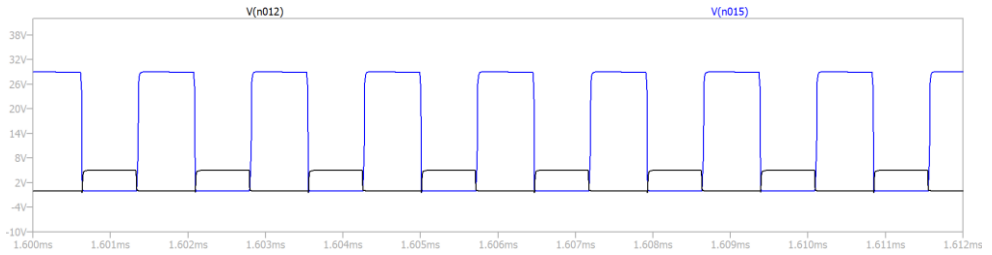


Şekil 8. 48Voutput 5A çıkış 240W GaN Boost Modu 685KHz

Buck moduna ilişkin 685 kHz ile sürülür iken giriş gerilimi, çıkış gerilimi ve çıkış akım grafiği Şekil 9’da sunulmuştur. Şekil 10’da buck modunda MOSFET kapı gerilimleri gösterilmektedir.



Şekil 9. 12V Output 5A çıkış 60W GaN Buck Modu 685KHz



Şekil 10. 685KHz 24Vinput 12V Output 5A çıkış 60W GaN Buck Modu

Anahtarlama Elemanlarının Davranışı ve Yarıiletken Temelli Performans Analizi

GaN tabanlı anahtarlama elemanı olarak EPC2218 tercih edilmiştir. EPC2218, 100 V drain–source dayanımı, tipik 3.2 m Ω iletim direnci, 14 nC gate yükü GaN yapısı sayesinde yüksek frekanslı DC–DC dönüştürücüler için optimize edilmiş bir anahtarlama elemanıdır. Silikon tabanlı karşılaştırma elemanı olarak Infineon OptiMOS™ 3 ailesine ait IPA030N10N3 kullanılmıştır. IPA030N10N3, 100 V drain–source dayanımı, tipik 3.0 m Ω iletim direnci ve 79 A akım kapasitesi ile 24 V girişli buck–boost dönüştürücülerde güvenli çalışma sunmaktadır. Ancak Si dinamik karakteristikleri GaN’a kıyasla oldukça

yüksektir. Toplam gate yükü 206 nC, çıkış yükü 273 nC, giriş kapasitansı 15 nF olup gövde diyoduna ait ters toparlanma yükü yaklaşık 190 nC, toparlanma süresi ise 80 ns seviyesindedir.

Tablo 1. GaN ve Si Tabanlı Güç Anahtarlarının Temel Elektiksel Parametrelerinin Karşılaştırılması

Özellik	EPC2218	IPA030N10N3
Teknoloji	eGaN FET	OptiMOS™ 3 (Si)
VDS	100 V	100 V
RDS	3.2 mΩ	3.0 mΩ
ID	60 A	79 A
Qg	14 nC	206 nC

EPC2218 ve IPA030N10N3'ün karşılaştırmalı olarak incelenebilmesi amacıyla Tablo 1'de özetlenen temel parametreler dikkate alınmıştır. İki anahtarlama elamanı arasında iletim kayıpları açısından yakın değerler bulunmaktadır. Dolayısıyla frekans arttıkça switching kayıplarındaki farklılaşmanın belirginleşmesi beklenmektedir. Anahtarlama frekansının dönüştürücü performansı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla sistem 685 kHz ile 2 MHz aralığında çalıştırılmıştır.

Simülasyon Tabanlı Performans Değerlendirmesi

LT8390A kontrolcü, dört anahtarlı buck–boost topolojisini tek bir sürekli yakınsama döngüsü içerisinde yönetecek biçimde tasarlanmıştır. Ürün, akım modlu kontrol yaklaşımını kullanmakta ve her anahtarlama periyodunda bobin akımını izleyerek duty cycle ayarlamasını doğrudan bu bilgilere dayandırmaktadır. Bu yapı, hem buck hem boost bölgelerinde hızlı geçici rejim sağlarken mod geçişlerinde kontrol sürekliliğinin korunmasına imkân verir. Geri besleme döngüsünde kullanılan hata yükselteci, yük değişimlerine verilen tepkinin bant genişliğini belirlemekte olup, çalışmada hem yüksek hem düşük frekans koşullarında gerilim regülasyonunun kararlı biçimde sürdürülmesine katkı sağlamıştır. Bu bölümde dört anahtarlı non-inverting buck-boost dönüştürücünün GaN ve silikon tabanlı güç elemanlarıyla farklı anahtarlama frekanslarında gösterdiği performans, akım dalgalanmaları, anahtarlama dalga şekilleri ve dinamik yük tepkisi açısından detaylı şekilde değerlendirilmiştir.

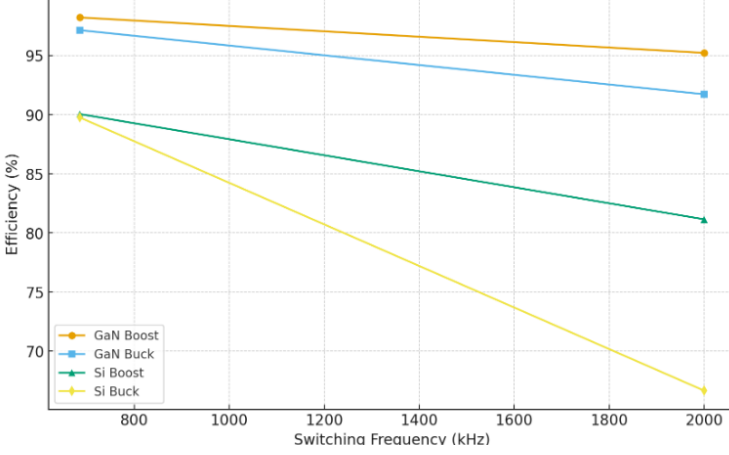
Tablo 2. Farklı Anahtarlama Frekanslarında GaN ve Si Anahtarlarla Elde Edilen Buck ve Boost Modu Performans Sonuçları

Anahtarlama Elemanı	Yapı	Fsw	Mod	Vout	Pin (W)	Pout (W)	Verim (%)	ripple, pP
EPC2218	GaN	2 MHz	Boost	48 V	241.71	230.15	95.22	0.031316
EPC2218	GaN	685 kHz	Boost	48 V	234.28	230.12	98.22	0.10609
EPC2218	GaN	2 MHz	Buck	12 V	65.37	59.96	91.73	0.006556
EPC2218	GaN	685 kHz	Buck	12 V	61.72	59.96	97.14	0.052731
IPA030N10N3	Si	2 MHz	Boost	48 V	51.3	41.63	81.15	–
IPA030N10N3	Si	685 kHz	Boost	48 V	266.18	239.7	90.05	0.10441
IPA030N10N3	Si	2 MHz	Buck	12 V	89.94	59.95	66.66	–
IPA030N10N3	Si	685 kHz	Buck	12 V	66.79	59.96	89.77	0.052678

Verim hesaplamalarında LTspice'in zaman ortalamalı güç ölçümüne dayanan .meas komutları kullanılmıştır. Giriş gücü, giriş gerilimi ile giriş akımı üzerinden, çıkış gücü ise çıkış gerilimi ile çıkış akımı üzerinden hesaplanmıştır. Verim ise çıkış gücü ile giriş gücü ilişkisi ile elde edilmiştir. Tablo 2'de anahtarlama frekansı ve yarıiletken teknolojisinin dört anahtarlı buck-boost dönüştürücünün toplam performansı üzerinde belirleyici bir rol oynadığı görülmektedir. Özellikle anahtarlama frekansı arttıkça hem verimde hem de çıkış dalgalanmasında gözlenen değişim, GaN ve silikon arasındaki temel teknolojik farkları açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

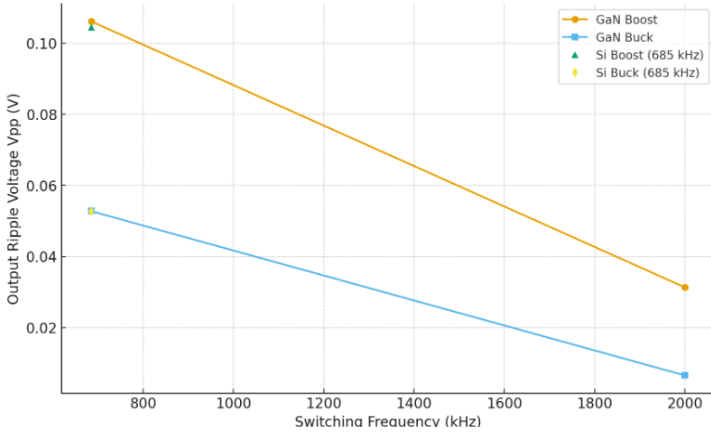
Silikon tabanlı MOSFET'in 2 MHz frekansta verim ve dalga şekli ölçümlerinin yer almamasının temel nedeni, bu çalışma bölgesinde anlamlı bir performans sergileyememesidir. Silikon MOSFET, yüksek gate yükü, yüksek çıkış kapasitansı ve belirgin ters toparlanma akımı nedeniyle frekans arttıkça hızla artan bir anahtarlama kaybı üretmektedir. 2 MHz civarında bu kayıplar, hem dönüştürücünün kararlı bir kontrol döngüsü içinde çalışmasını zorlaştırmış hem de çalışma süresinin kabul edilebilir ısı sınırların dışına çıkmasına yol açmıştır. Bu nedenle silikon MOSFET ile yapılan simülasyonlarda 2 MHz noktası anlamlı verim verisi üretmediği için değerlendirme dışı bırakılmıştır.

Verim grafiği, GaN tabanlı EPC2218'in hem buck hem de boost modlarında, incelenen iki frekans noktasının tamamında silikon MOSFET'e göre belirgin üstünlük sağladığını göstermektedir. 685 kHz'de GaN %98 seviyesine ulaşırken, aynı koşullarda silikon %90 civarında kalmıştır. Frekans 2 MHz'e yükseltildiğinde silikon MOSFET'in anahtarlama kayıpları hızlı şekilde artmış ve verimi hem boost hem buck modlarında ciddi biçimde düşmüştür. Şekil 11'de verim ile anahtarlama frekansı arasındaki ilişti grafik olarak verilmiştir.



Şekil 11. GaN ve Si anahtarlar için verim–anahtarlama frekansı ilişkisi

Hem buck hem boost modlarında GaN, 2 MHz'de oldukça düşük ripple değerlerine ulaşmış, özellikle buck modunda birkaç milivolt seviyesinde çıkış dalgalanması elde edilmiştir. Silikon da düşük frekansta kabul edilebilir ripple seviyeleri sunmakla birlikte, 2 MHz frekans noktasında yeterli veri bulunmamakla beraber boost modundaki ripple değerleri GaN'a kıyasla daha yüksek seyretmiştir. Bu durum, yüksek frekanslı çalışmada GaN tabanlı anahtarlama elemanlarının sadece verim değil, aynı zamanda çıkış kalitesi açısından da avantajlı olduğunu göstermektedir. Şekil 12'de ripple gerilimi ile anahtarlama frekansı arasındaki ilişti grafik olarak verilmiştir.



Şekil 12. GaN ve Si anahtarlar için çıkış ripple gerilimi–anahtarlama frekansı ilişkisi

Sonuç

Bu çalışma, dört anahtarlı non-inverting buck–boost dönüştürücülerde anahtarlama frekansının GaN ve silikon tabanlı güç elemanları üzerindeki etkilerini ayrıntılı biçimde incelemiştir. Simülasyon sonuçları, yarıiletken teknolojisinin yüksek frekanslı DC–DC dönüştürücü performansı üzerinde belirleyici olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. GaN tabanlı EPC2218, 685 kHz’den 2 MHz’e kadar tüm çalışma aralığında silikon MOSFET’e göre anlamlı verim üstünlüğü sağlamıştır. Frekans arttıkça bu farkta artmıştır. 2 MHz’de GaN yüksek verimi korurken silikon MOSFET’in switching kayıpları belirgin şekilde artarak verimi düşürmüştür.

Ayrıca ripple analizleri yüksek frekansta çıkış dalgalanmasının azalmasına rağmen bu avantajdan yalnızca GaN tam olarak yararlanabildiğini göstermiştir. Silikon MOSFET’ler yüksek frekansta hem artan kayıplar hem de dv/dt sınırlamaları nedeniyle kararlı çalışmayı sürdürememiştir.

Bu bulgular ışığında GaN tabanlı dört anahtarlı buck–boost dönüştürücülerin otomotiv 12/24 V güç sistemleri, yüksek bant genişlikli LED sürücüler, taşınabilir enerji modülleri ve yüksek güç yoğunluğu gerektiren dönüştürücüler için son derece uygun olduğu görülmektedir. Silikon MOSFET’ler düşük frekanslı ve maliyet öncelikli tasarımlarda halen kullanılabilir olmakla birlikte, yüksek frekans–yüksek verim ekseninde GaN tabanlı çözümlerin geleceğin güç elektroniği sistemlerinde öncelikli olacağı açıktır.

Kaynaklar

- [1] Malou, A., Allard, B., Hijazi, A., & Lin-Shi, X. (2018). 4-Switch Buck-Boost DC–DC Converter: A Case Study. *Journal of Low Power Electronics*, 14(4), 558-581.
- [2] Lin, G., Li, Y., & Zhang, Z. (2025). A Review of Control Strategies for Four-Switch Buck–Boost Converters. *World Electric Vehicle Journal*, 16(6), 315.
- [3] Kasper, M., Bortis, D., & Kolar, J. W. (2013). Classification and comparative evaluation of PV panel-integrated DC–DC converter concepts. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(5), 2511-2526.
- [4] Mahmud, S., Collings, W., Kini, R., Javaid, A., Khanna, R., Barchowsky, A., ... & Zapien, X. (2020). A GaN-based four-switch buck-boost converter using ripple correlation control for maximum power point tracking in dynamic deep space environments.
- [5] Heydari, M., Huang, Q., & Huang, A. Q. (2023, March). A 400w, 99.3% efficient gan buck-boost converter. In *2023 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)* (pp. 2223-2230). IEEE.
- [6] Şehirli, E. (2020). Comparison of Si and GaN Semiconductor Based SEPIC DC-DC Led Driver. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 464-471.
- [7] Tripathi, R. N. (2023). Dead-Time Evaluation With Switching Frequency for GaN-Based Non-Inverting Buck-Boost DC–DC Converter Using FPGA-Based High-Frequency Control. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 12(1), 496-504.
- [8] Huang, X., Lee, F. C., Li, Q., & Du, W. (2015). High-frequency high-efficiency GaN-based interleaved CRM bidirectional buck/boost converter with inverse coupled inductor. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(6), 4343-4352.
- [9] Koszel, M., Grzeszczak, P., Nowatkiewicz, B., & Wolski, K. (2021). Design, analysis and comparison of Si-and GaN-based DC-DC wide-input-voltage-rangeBuck-boost converters. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 337-343.
- [10] Bektas, M. T., Aytar, O., Coban, M., & Fidan, M. (2024, November). Analysis of the Performance of MOSFET, IGBT and GaN FET Power Switches Used as Switching Elements on Buck Type DC-DC Converter. In *2024 4th International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME)* (pp. 1-5). IEEE.
- [11] Lidow, A., De Rooij, M., Strydom, J., Reusch, D., & Glaser, J. (2019). GaN transistors for efficient power conversion. John Wiley & Sons.
- [12] Kruse, K., Elbo, M., & Zhang, Z. (2017, March). GaN-based high efficiency bidirectional DC-DC converter with 10 MHz switching frequency. In *2017*

IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) (pp. 273-278). IEEE.

- [13] Liu, L., Dai, J., Lee, J., Kang, S., & Jin, C. (2025). High-Efficiency Soft-Switching Technique for a Cascaded Buck–Boost Converter Based on Model Predictive Control Using GaN Devices. *Electronics*, 14(22), 4499.

BÖLÜM 13

RF ve Mikrodalga Sistemlerinde Metayüzey Tabanlı Yaklaşımlar: Tasarım İlkeleri ve Güncel Eğilimler

Muhammed Malkoç¹

¹ Arş. Gör., Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 0000-0002-8346-2475

1. Giriş

Elektromanyetik dalgaların üretilmesi, iletilmesi ve en önemlisi istenildiği şekilde yönlendirilmesi, modern haberleşme teknolojilerinin temel taşı oluşturmaktadır. Yüzyılı aşkın bir süredir mühendisler, elektromanyetik spektrumunu kontrol altına alabilmek için doğada bulunan malzemelerin (bakır, silikon, dielektrikler vb.) karakteristik özelliklerine bağımlı kalmışlardır. Geleneksel yöntemlerde, bir dalganın yönünü değiştirmek veya odaklamak için lensler, kavisli aynalar veya karmaşık faz kaydırıcı devreler kullanılması gerekmiştir. Ancak bu geleneksel bileşenler, dalganın yayılımını kontrol etmek için malzemenin kalınlığına ve geometrik şekline güvendiklerinden, genellikle hacimli, ağır ve yüksek maliyetli sistemlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Günümüzde ise mobil cihazların küçülmesi, nesnelerin interneti (IoT) ve 5G/6G gibi teknolojilerin yükselişi, çok daha kompakt, verimli ve esnek kontrol mekanizmalarını zorunlu kılmıştır.

İşte bu teknolojik darboğazın aşıldığı noktada, "metayüzeyler" (metasurfaces) devrim niteliğinde bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Hacimsel metamalzemelerin iki boyutlu eşdeğeri olarak tanımlanabilecek olan metayüzeyler, doğada kendiliğinden bulunmayan egzotik elektromanyetik özellikleri yapay olarak elde etmemizi sağlayan ultra ince tabakalardır. Bu yapılar, dalga boyundan çok daha küçük ölçekte tasarlanmış periyodik veya yarı-periyodik birim hücrelerden (meta-atomlar) oluşur. Geleneksel optik ve mikrodalga kurallarının aksine, metayüzeyler dalgayı malzemenin içinde yol aldırarak değil, arayüzeyde ani faz, genlik ve polarizasyon süreksizlikleri yaratarak manipüle eder. Bu "Genelleştirilmiş Snell Yasası" prensibi, ışığın veya radyo dalgalarının neredeyse sıfır kalınlıktaki bir yüzeyde, istenilen açıda kırılmasını, odaklanmasını veya şekil değiştirmesini mümkün kılar.

Radyo Frekansı (RF) ve mikrodalga mühendisliği açısından bakıldığında, metayüzeylerin sunduğu potansiyel sadece akademik bir merak konusu olmaktan çıkıp endüstriyel bir gerekliliğe dönüşmüştür. Hantal parabolik antenlerin yerini alabilen düzlemsel lensler, duvarları ve pencereleri akıllı sinyal yansıtıcılarına dönüştüren yüzeyler ve görünmezlik pelerinini andıran radar kesit alanı azaltıcı kaplamalar, bu teknolojinin somut çıktıları arasındadır. Özellikle spektrumun giderek kalabalıklaştığı ve enerji verimliliğinin ön plana çıktığı günümüzde, metayüzeyler kayıplı ve ağır donanımlara olan ihtiyacı ortadan kaldırarak kablosuz haberleşmenin fiziksel katmanını yeniden tanımlamaktadır.

Bu kitap bölümü, metayüzeylerin teorik temellerinden başlayarak, RF bölgesindeki özgün tasarım yaklaşımlarını, üretim tekniklerini ve modern mühendislik problemlerine getirdiği yenilikçi çözümleri ele alacaktır. Statik tasarımlardan programlanabilir akıllı yüzeylere uzanan bu teknolojik evrim, RF dünyasının geleceğini şekillendiren en kritik yapı taşlarından biri olarak incelenecektir.

1.1 Metayüzeylerin Tanımı

Metayüzeyler, üç boyutlu metamateryallerin iki boyutlu türevi olarak, çalışma dalga boyuna göre alt dalga boyu ölçekli saçıcı elemanlardan oluşan ince yapılar olarak tanımlanır. Her bir meta-atomin boyutunun ve geometrisinin dikkatli seçilmesiyle, yüzeyin gelen elektromanyetik dalgalara verdiği cevap kontrol edilebilir (Bukhari, Vardaxoglou ve Whittow, 2019). Bu ince platform, gelen dalgaın genliğini, fazını ve polarizasyonunu yüksek hassasiyetle modüle ederek geleneksel hacimsel metamateryallere göre çok daha hafif, düşük profilli ve üretimi kolay bir alternatif sunar. Çalışma dalga boyundan çok daha küçük bir kalınlığa sahip olmaları, metayüzeylerin homojen bir sınır koşulu gibi davranmasını sağlar; böylece dalga yayılımına ilişkin sınır şartları etkin yüzey duyarlılıkları ile tanımlanabilir.

Yeniden yapılandırılabilir metayüzeyler, her meta-atom üzerine yerleştirilen ayarlanabilir elemanlar sayesinde elektromanyetik dalgaları dinamik olarak modüle eden bir yapıyı temsil eder. Liu ve çalışma arkadaşları, meta-atom üzerine entegre edilen varaktör diyot veya diğer anahtarlanabilir yükler aracılığıyla metayüzeylerin dalga boyu, faz, genlik, polarizasyon ve yön gibi beş parametreyi aynı anda kontrol edebildiğini; ayrıca bilgi bitlerinin fiziksel elektromanyetik dalga ile bütünleşerek “dijital metayüzey” kavramının ortaya çıktığını belirtir (Liu, Yang, Xu ve Li, 2023). Bu bağlamda, kodlamalı veya programlanabilir metayüzeyler dijital kontrol sinyalleriyle uyumlu çalışarak fiziksel dünya ile bilgi dünyası arasında köprü kurar ve klasik analog metayüzeylere kıyasla düşük maliyetli ve yüksek güvenilirlikli bir çözüm sunar.

1.2 Dalga Kontrolü ve Temel Özellikler

Her bir meta-atomin alt dalga boyu boyutları, gelen dalga üzerine yerel faz süreksizlikleri yerleştirmeye imkân verir. Bu sayede metayüzeyler, gelen dalgayı istenen yöne kırarak şekilde genelleştirilmiş Snell yasası uyarınca yeniden yönlendirebilir; aynı zamanda polarizasyon dönüşümü veya odaklama gibi işlemleri tek bir ince yüzey üzerinden gerçekleştirebilir. Programlanabilir metayüzeylerde her bir birim hücreye uygulanabilen farklı ikili veya çok seviyeli yük durumları, “kodlama dizileri” olarak adlandırılan düzenlemelerle dalga şekillendirme işlevlerini tanımlamaya olanak sağlar. Zhu ve arkadaşları, 2-bit çözünürlüğe sahip dikey ve yatay polarizasyonda çalışan programlanabilir bir metayüzey tasarlamış; p-i-n diyotlar ile donatılmış meta-atomin 2-bit faz kontrolü sayesinde $\pm 40^\circ$ tarama açısı ve yüksek çapraz polarizasyon ayrımı elde etmiştir (Zhu ve diğerleri, 2024). Bu tür düzenlemeler, programlanabilir metayüzeylerin çoklu fonksiyonları aynı açıklıktan sağlayabileceğini ve geleceğin yeniden yapılandırılabilir akıllı yüzeylerine temel oluşturduğunu göstermektedir.

1.3 Literatürde Uygulama Alanlarına Genel Bakış

Metayüzeyler, geniş bir frekans aralığında elektromanyetik dalgaları kontrol etme kabiliyeti sayesinde çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Haberleşme sistemleri, özellikle beşinci ve altıncı nesil hücresel ağlar, metayüzeylerden büyük fayda sağlamaktadır. Ding ve çalışma arkadaşları, 5G milimetre-dalga iletiminde sinyalin farklı geliş açılarına duyarsız olacak bir metayüzey tasarlayarak 27 GHz civarında $\pm 85^\circ$ aralığında kararlı faz farkı ve yüksek yansıma genliği elde etmiştir (Ding ve diğerleri, 2025). Bu çalışma, milimetre-dalga kanalının doğal zayıflama ve kırılgenlik problemlerinin üstesinden gelmek için metayüzeylerin nasıl kullanılabileceğini göstermektedir.

Basit tasarımları sayesinde ileti dizi antenlerin tasarımlarında da düşük bütçeli basit yapı olarak kullanım örnekleri de literatürde yer almaktadır (Malkoç, Ünalı ve Çimen, 2025; Malkoç, Muhammed, 2024; Malkoç, Muhammed, Ünalı, S., ve Çimen, S., 2024). RF alanına ek olarak, metayüzeyler çoklu frekanslarda aynı açıklıktan ışın taraması yaparak radar ve sensör sistemlerinde de değerli çözümler sunar; örneğin, iki farklı frekansta ışın taraması yapan programlanabilir metayüzey tasarımları sayesinde 6 GHz ve 10 GHz’de -60 ile 60 arasında sürekli tarama sağlanabilmektedir (W. S. Hu, Liu, Gong, Wang ve Li, 2023).

Metayüzeylerin bir diğer etkileyici uygulaması, Bessel ışınlarının birden çok hedefe yönlendirilerek verimli iletişim sağlamasıdır. Qu ve arkadaşları, kablosuz sistemlerde çoklu odak noktaları boyunca diffraksiyonsuz Bessel ışınlarını üretmek amacıyla faz modülasyonu ve ikili kodlama tekniklerini kullanan programlanabilir bir metasurface önermiştir; bu sayede her bir hedef nokta için benzer güç seviyeleri sağlanarak arka arkaya yerleştirilen alıcıların engelleme etkisi ortadan kaldırılmıştır (Qu, Lan, Su, Zuo ve Song, 2024). Benzer şekilde, metayüzeyler sağlık izleme alanında da yenilikçi çözümlerin kapısını açmaktadır. Zhou ve çalışma arkadaşları, Wi-Fi tabanlı solunum algılama sistemini geliştirmek için dijital programlanabilir metayüzelerin zaman ve uzay modülasyon özelliklerinden yararlanarak dört kişiye kadar solunum sinyallerinin aynı ortamda ayrıştırılmasını ve doğru şekilde tespit edilmesini başarmışlardır (Zhou ve diğerleri, 2025). Bu sonuçlar, metayüzeylerin yalnızca haberleşme değil, aynı zamanda biyomedikal izleme ve akıllı yaşam teknolojilerinde de önemli roller üstleneceğini göstermektedir.

2. Metayüzeylerin Tanımı ve Tarihsel Gelişimi

2.1 Tanım ve Temel Kavramlar

Metayüzeyler, gelen elektromanyetik dalgaların özelliklerini son derece ince bir yüzey üzerinde kontrol etmek amacıyla tasarlanmış iki boyutlu yapay yapılardır. Modern bir çalışmaya göre, bir metayüzey tipik olarak dalgaboyundan çok daha küçük boyutlara sahip periyodik mikro yapısal birimlerden oluşur; bu mikro birimlerin boyut, şekil ve düzenlemesi değiştirilerek yansıyan ve iletilen

dalgaların genliği, fazı ve yönü hassas şekilde ayarlanabilir (Guan, Xu, Lou, Zhao ve Wang, 2024). Bu mikro yapılar sayesinde metayüzeyler, gelen dalgaların odaklanması, saptırılması ve polarizasyon dönüşümü gibi işlevleri gerçekleştirebilir. Ayrıca metayüzeyler hacimli metamalzemelere kıyasla çok daha ince ve hafif oldukları için düşük profil ve entegrasyon kolaylığı sunar. Mikrodalga bandında yeniden yapılandırılabilir metayüzey tabanlı ışın taraması gerçekleştiren bir çalışmada, bu yapıların düşük maliyetleri, düşük profilleri ve güçlü dalga kontrol yetenekleri nedeniyle elektromanyetik toplulukta araştırma odağı haline geldiği vurgulanmaktadır. Bu tasarım paradigmaları, hem pasif hem de aktif metayüzeyler için geçerlidir; aktif metayüzeylerde PIN diyotlar, varaktörler veya MEMS yapıları gibi ayarlanabilir bileşenler kullanılarak faz ve genlik modülasyonu gerçek zamanlı olarak kontrol edilebilir.

2.2 Tarihsel Gelişim

Metayüzeylere ilişkin kavramsal gelişim, yüzey dalgalarının kontrolüne yönelik erken çalışmalara dayanmaktadır. 1902 yılında Robert W. Wood, ince metal ızgaraların yansıma tayfında ani karar ve parlama bantları gözlemlemiş ve bu fenomen daha sonra “Wood anomalileri” olarak anılmıştır (Wood, 1902). Yakın tarihli bir inceleme, Wood anomalilerinin optik toplulukta refleksiyon tipi metal ızgaralar üzerindeki ani yansıma/geçiş değişimleri olarak tanımlandığını ve bu anomalilerin Rayleigh (Rayleigh, 1907) ve Fano (Fano, 1941) gibi araştırmacılar tarafından yüzey plazmonları ve difraksiyon emirlerinin geçişine bağlandığını bildirmektedir (Quan, Zhou, Cao ve Xu, 2022). Bu erken buluşlar, yüzey plazmon polaritonlarının keşfi ve periyodik yapılar üzerinde difraktif anomalilerin açıklanması yoluyla metayüzey konseptinin fiziksel temelini oluşturmuştur.

1960’lardan itibaren mikrodalga alanında frekans seçici yüzeyler (FSS) olarak adlandırılan ince film yapıları radar radomları, filtreler ve emicilerde kullanılmaya başlandı. FSS’ler günümüz metayüzeylerinin öncülleridir; 2014 tarihli bir incelemeye göre FSS’ler en az 50 yıldır varlığını sürdürmekte olup “iletken veya dirençli malzemeden oluşan bir desene sahip ince yüzeyler” olarak tanımlanırlar. Bu yapılarda indüktör, kapasitör, diyot ve transistör gibi devre elemanlarının eklenmesiyle aktif veya yarı aktif özellikler de kazandırılabilir (Mackay, Sanz-Izquierdo ve Parker, 2014). Metayüzey fikrinin olgunlaşmasında FSS teknolojisinin geniş uygulama alanı, üretim deneyimi ve ince film tasarım teknikleri önemli rol oynamıştır.

Metayüzeylerin çağdaş anlamda çıkışı ise 2010’lu yılların başında gerçekleşti. 2011 yılında Nanfang Yu ve çalışma arkadaşları (Yu ve diğerleri, 2011), Fermat ilkesini genişleterek bir arayüzde aniden değişen faz süreksizliklerinin ışığın yansıma ve kırınımını nasıl değiştirebileceğini gösteren genelleştirilmiş kırınım yasasını ortaya koydular. Bu teoriye göre, bir metayüzey üzerindeki meta-atomlar boyunca sabit bir faz gradiyenti uygulandığında, kırılmış veya yansımış ışınların

yönü serbestçe ayarlanabilir; bu yönlendirme, V-şekilli altın nanoantenlerden oluşan faz gradyanlı metayüzeylerle deneysel olarak doğrulanmıştır (J. Hu, Bandyopadhyay, Liu ve Shao, 2021) Bu buluş, düzlemsel optik elemanların (metalenks) ve anomal kırınım cihazlarının geliştirilmesinin yanı sıra “genelleştirilmiş Snell yasası” kavramının ortaya çıkmasını sağlamıştır.

2014 yılında Tie Jun Cui ve ekibinin öncülük ettiği bir diğer kilometre taşı ise dijital kodlama metayüzeleri kavramıdır (Cui, Qi, Wan, Zhao ve Cheng, 2014). Bu yaklaşımda, her meta-atom iki veya daha fazla ayrık faz durumuna sahip “0” ve “1” gibi ikili kodlarla temsil edilerek elektromanyetik dalga fazının dijital biçimde programlanması sağlanır. 2018 yılında yayımlanan bir çalışmada, dijital metamateryallerin 2014’te önerildiği, “0” ve “1” bitlerine karşılık gelen birim hücre fazlarının 180° faz farkı ile kodlandığı ve N-bit kodlu metayüzelerde 2^N ayrık faz durumunun elde edildiği bildirilmiştir (Della Giovampaola ve Engheta, 2014; X. G. Zhang ve diğerleri, 2018). Bu kodlama prensibi, meta-atomların dizilimlerinin uzamsal veya frekans alanında düzenlenmesiyle dalga cephelerinin, polarizasyonun ve saçılma özelliklerinin istenilen biçimde kontrol edilmesine olanak tanımıştır. Böylece metayüzeyler yalnızca analog bir faz profiliyle değil, aynı zamanda dijital bilgi tabanlı tasarım stratejileriyle de programlanabilir hale gelmiştir.

Özetle, metayüzeylerin tarihsel gelişimi Wood anomalilerinin keşfi ve yüzey plazmon araştırmalarıyla başlayan, frekans seçici yüzey teknolojileriyle devam eden ve 2010’lardan itibaren genelleştirilmiş Snell yasası ve dijital kodlama yaklaşımlarıyla yeni bir boyut kazanan çok disiplinli bir evrimi ifade etmektedir. Bu tarihsel perspektif, metayüzey tasarım yaklaşımlarının ve uygulamalarının sonraki bölümlerde ele alınacak çeşitliliğine ışık tutmaktadır.

3. Metayüzey Sınıfları ve Tasarım Yaklaşımları

Metayüzeyler, elektromanyetik dalga kontrolünde sağladıkları esneklik ve düşük profil sayesinde farklı türlere ayrılır. Pasif metayüzeyler sabit bir elektromanyetik yanıt sunar; bir kez kurulduğunda, dalgaların genliğini ve fazını değiştiremezler ve çoğunlukla reflektör veya lens benzeri elemanlar olarak görev yaparlar. Aktif metayüzeyler ise meta-atomlara p-i-n diyot, varaktör veya MEMS gibi ayarlanabilir elemanlar yerleştirilerek gerçekleştirilir; bu sayede yansıyan veya iletilen dalgalarda anlık faz ve genlik ayarı mümkün olur ve ışın tarama veya modülasyon gibi dinamik işlevler sağlanır. Bu sınıflandırmanın ötesinde, programlanabilir metayüzeler (PMS) klasik analog tasarımın sayısal kodlama ile birleştirildiği yapıların genel adıdır. PMS’lerde her meta-atom belirli bir bit değerini (örneğin “0” veya “1”) temsil edecek şekilde yapılandırılır; birim hücreler arasındaki faz farkı dijital olarak kontrol edildiği için elektromanyetik parametrelerin sayısal ortama taşınması ve dalga cephelerinin hızlıca yeniden programlanması mümkün olur. Bu dijitalleştirme, metayüzey tasarımını yazılım

tabanlı hale getirerek fiziksel ve dijital dünyalar arasında köprü kurulmasına olanak tanır.

Tasarım yöntemleri de metayüzey performansını belirler. Geleneksel yansıma veya iletim tipi metayüzeylerde faz kontrolü, birim hücre geometrisinin boyut ve şeklinin değiştirilmesiyle sağlanır. Aktif veya programlanabilir yapılar için ise daha karmaşık tasarım yaklaşımları geliştirilmiştir. Örneğin, bir çalışmada programlanabilir iletim metayüzelerinin üç temel tasarım yöntemi sıralanmıştır: (1) art arda dizilmiş elektrik rezonans dokuları, (2) Huygens yüzeyleri ve (3) alıcı–faz kaydırıcı–verici sistemler. İlk iki yöntem, katmanlı yapıların kalınlığı ve dar çalışma bant genişliği gibi dezavantajlar taşırken; üçüncü yöntemde meta-atom, gelen dalgayı alıp fazını bağımsız olarak ayarladıktan sonra ilettiği için tasarım mantığı net ve optimizasyonu kolaydır. Böylece, tasarımcılar uygulama gereksinimlerine göre farklı sınıflar ve yöntemler arasından seçim yapabilirler.

4. Metayüzeylerin RF Temelleri

Metayüzeylerin teorik temelleri, elektromanyetik sınır koşullarının ve dalga yayılım prensiplerinin iki boyutlu bir yüzey üzerinde yeniden yorumlanmasına dayanır. Huygens metayüzeleri (HMS), ortogonal elektrik ve manyetik dipollerin eşzamanlı olarak düzenlenmesinden oluşan ince bir tabakadır; bu dipoller bir arada “Huygens kaynakları” oluşturur ve gelen dalga alanını istenilen doğrultuda tekrar yayımlayarak dalga cephesini yeniden şekillendirir (M. Chen, Kim, Wong ve Eleftheriades, 2018). Pasif HMS’lerde dipoller gelen dalgaların indüklediği akımlarla uyarılır; bu sayede yansız kırılma, mükemmel anomal yansıma ve arbitrary anten ışın şekillendirme gibi işlemler gerçekleştirilebilir. Aktif HMS’lerde ise elektrik ve manyetik akımlar dışarıdan beslenerek “görünmezlik” veya dar odaklama gibi ileri uygulamalar sağlanır. HMS’lerin bir diğer özelliği, birim hücrelerinin ve toplam kalınlığının dalga boyunun çok altında olmasıdır; bu nedenle yüzey, uzamsal olarak değişen yüzey empedansları ve admitansları ile homojenleştirilebilir. Bu model, Schelkunoff’un eşdeğerlik prensibinin genelleştirilmiş Huygens ilkesi ile birleşmesi sonucu elde edilir ve metayüzeye gelen dalganın tüm genlik, faz ve polarizasyon bileşenlerinin kontrol edilebileceğini gösterir (M. Chen ve diğerleri, 2018).

Metayüzeylerin dalga yönlendirmedeki başarısı, genelleştirilmiş Snell yasası ile açıklanır. Klasik Snell yasasında yansıma ve kırılma açısı arayüzeyin malzeme indisleriyle belirlenirken, genelleştirilmiş formda arayüzey üzerinde konum-bağımlı bir faz süreksizliği tanımlanır (Gutiérrez ve Sabra, 2025). 2011 yılında tanıtılan bu yaklaşımda, iki ortamı ayıran yüzey üzerinde tanımlanan bir faz fonksiyonunun gradyanı, yansıtılan ve kırılan dalgaların yönünü belirler; bu ifade vektörel biçimde denklem (1) deki gibi yazılır;

$$n_1 * k_i - n_2 * k_t = \lambda n(P) + \nabla f(P) \quad (1)$$

olarak yazılır (Gutiérrez ve Sabra, 2025). Burada k_i gelen dalganın birim vektörü, k_t kırılan dalganın birim vektörü, $n(P)$ yüzey normali ve $f(P)$ faz fonksiyonudur. Faz süreksizliği sayesinde bir metayüzey, dalga cephesine arzu edilen eğimi kazandırır ve gelen dalganın enerjisini seçilen açılara yönlendirebilir. Söz konusu genel yasa, Maxwell denklemlerinin dağılımlar kuramı kullanılarak türetilmiş sınır koşullarından elde edilmiştir; böylece metayüzelerin ultra-ince metalensler ve planar hologramlar gibi optik ve RF uygulamalardaki tasarımını yönlendiren temel teori ortaya konmuştur (Gutiérrez ve Sabra, 2025).

5. Metayüzeylerin RF Uygulama Alanları

Metamateryallerin iki temel türünden biri olan metayüzeyler, doğada bulunmayan özel özellikleri nedeniyle RF ve mikrodalga mühendisliği alanında çeşitli uygulamalara sahiptir (Manikandan ve diğerleri, 2023). Metayüzeyler, anten kazancını, bant genişliğini, kompaktlığı ve geri dönüş kaybını iyileştirmek gibi amaçlarla antenlerin performansını artırmada önemli rol oynamaktadır (Kumar, Pavithra, Ranjith, Kiruthika ve Kavin, 2023). Özellikle, metayüzey tabanlı ve metayüzeyden ilham alan RF bileşenleri ve antenler, telsiz haberleşme, radyo frekansı tanımlama (RFID) ve sensörler gibi uygulamalarda ilgi çekici yeni cihazların geliştirilmesine odaklanmıştır (Martín, 2012). Ayrıca, metayüzey yapıları, RF enerji hasadı (harvesting) sistemlerinde verimlilik artışı sağlamak amacıyla mikroşerit doğrultucu antenin (rectenna) arkasına yapay manyetik iletken (AMC) tipi veya önüne çoklu yarık halka rezonatörler (MSRR) yerleştirilerek kullanılabilir (Eardprab ve Chanadee, 2021). Biyomedikal uygulamalar için geliştirilen metayüzey tabanlı antenler, salınan elektromanyetik (EM) radyasyonu manipüle ederek sistemin genel performansını artırmayı amaçlar; buna örnek olarak beyin felci tespiti ve glikoz takibi için EM kuplajı artırma amacıyla kullanılan alt dalga boyu metalik yapılar verilebilir (Tzarouchis ve diğerleri, 2024). Bu çok yönlü özellikler sayesinde, metayüzeyler kablolu iletişimde kesintisiz bağlantı ve gelişmiş sinyal kalitesi taleplerini karşılayan yüksek kazançlı, kompakt çözümler sunmaktadır (Kumar ve diğerleri, 2023).

6. İleri Düzey ve Yeni Nesil Uygulamalar

Geleneksel metayüzeyler, üretim aşamasında belirlenen sabit fiziksel özelliklere sahipken, günümüz teknolojisi bu yapıların dinamik, ayarlanabilir ve hatta bilişsel yeteneklere sahip olmasını talep etmektedir. Bu bağlamda, RF mühendisliğindeki en önemli paradigma değişimlerinden biri, sabit pasif yüzeylerden Programlanabilir ve Dijital Metayüzeylere geçiş olmuştur. Geleneksel olarak etkin geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik gibi analog parametrelerle tanımlanan metayüzeylerin aksine, Cui ve ekibi tarafından ortaya konulan dijital metayüzey kavramı, elektromanyetik tepkileri dijital bitler ('0' ve

'1') ile kodlayarak kontrol etme prensibine dayanır (Cui, Qi, Wan, Zhao ve Cheng, 2014). Bu yapılarda, birim hücrelere entegre edilen PIN diyotlar veya varaktörler aracılığıyla yansıyan dalganın fazı gerçek zamanlı olarak değiştirilebilir; örneğin '0' durumu 0 derece fazı, '1' durumu ise 180 derece faz farkını temsil edecek şekilde ayarlanarak, FPGA (Alan Programlanabilir Kapı Dizileri) üzerinden elektromanyetik dalgalar dijital algoritmalarla şekillendirilebilir (Cui ve diğerleri, 2014).

Bu dijital kontrol yeteneği, 6G ve ötesi kablosuz haberleşme sistemlerinin temel yapı taşlarından biri olarak görülen Yeniden Yapılandırılabilir Akıllı Yüzeylerin (RIS - Reconfigurable Intelligent Surfaces) doğuşuna öncülük etmiştir. RIS teknolojisi, kablosuz yayılım ortamını kontrol edilemeyen bir boşluk olmaktan çıkarıp, sinyalleri istenen noktaya odaklayabilen veya sönmüleyebilen "akıllı bir radyo ortamına" dönüştürmeyi hedefler (Di Renzo ve diğerleri, 2020). Özellikle engellerin arkasında kalan (Non-Line-of-Sight) kullanıcılar için, RIS panelleri baz istasyonundan gelen sinyali yansıtarak sanal bir görüş hattı oluşturur ve bu sayede kapsama alanı ve enerji verimliliği, aktif rölelere veya ekstra baz istasyonlarına ihtiyaç duyulmadan artırılır (Di Renzo ve diğerleri, 2020).

Statik veya yarı-statik ayarlamaların ötesinde, metayüzeylerin zaman alanında da modüle edilmesiyle Uzay-Zaman (Space-Time) Kodlamalı Metayüzeyler geliştirilmiştir. Sadece uzaysal faz dağılımını değil, aynı zamanda yüzeyin tepkisini zaman içinde periyodik olarak değiştirerek, gelen dalganın frekansını harmoniklerine kaydırmak (frekans dönüşümü) ve böylece karşılıklık (reciprocity) ilkesini kırarak tek yönlü dalga iletimi sağlamak mümkün hale gelmiştir (L. Zhang ve diğerleri, 2018).

7. Üretim Teknikleri, Kısıtlar ve Ölçümler

Metayüzeylerin mikrodalga frekanslarındaki üretimi, genellikle endüstriyel standartlarda ve düşük maliyetli yöntemlere dayanır. Örneğin, mikrodalga rejiminde çalışan ve "mükemmel soğurucu" (perfect absorber) olarak tasarlanan ilk metayüzey yapılarından biri, standart baskılı devre kartı (PCB) teknolojisi kullanılarak üretilmiştir; bu süreçte bakır rezonatörler, fotolitografi yöntemiyle FR4 gibi dielektrik tabanlar üzerine işlenmiştir (Landy, Sajuyigbe, Mock, Smith ve Padilla, 2008). Frekans optik bölgeye kaydığında ise üretim teknikleri değişmek zorundadır. Görünür ışık ve yakın kızılötesi dalga boylarında çalışan metayüzeyler ("flat optics" olarak adlandırılan alan), ışığın dalga boyundan daha küçük nanoyapılar gerektirdiği için, bu tasarımların hayata geçirilmesinde genellikle elektron hüzmeleri litografisi (EBL) veya odaklanmış iyon hüzmeleri (FIB) gibi yüksek çözünürlüklü litografi teknikleri kullanılmaktadır (Yu ve Capasso, 2014).

Ancak bu yapıların performansı fiziksel kısıtlarla sınırlıdır. Metayüzeylerin en temel kısıtlarından biri, metalik bileşenlerin doğasından kaynaklanan omik

kayıplardır (ohmic losses). Özellikle optik frekanslara çıkıldığında metallerin iletkenliğinin düşmesi ve kayıpların artması, verimliliği ciddi oranda sınırlandıran bir faktör olarak tanımlanmıştır (Glybovski, Tretyakov, Belov, Kivshar ve Simovski, 2016). Bir diğer önemli kısıt ise bant genişliğidir. Rezonans tabanlı metayüzeyler, doğaları gereği belirli bir frekans etrafında çalıştıkları için dar bantlı olma eğilimindedirler; bu durum, geniş bantlı operasyon gerektiren uygulamalar için temel bir zorluk teşkil eder ve pasif (passive) tasarımların statik yapısından kaynaklanan bir sınırlamadır (Monticone ve Alù, 2017).

Üretilen metayüzeylerin elektromanyetik özelliklerinin doğrulanması için hassas ölçüm ve parametre çıkarma (retrieval) yöntemleri uygulanır. Mikrodalga frekanslarında numunelerin yansıma ve iletim katsayılarını (S-parametreleri) elde etmek için genellikle bir Vektör Ağ Analizörü (VNA) kullanılır ve bu ölçümler, numunenin bir dalga kılavuzu içine yerleştirildiği düzeneklerde gerçekleştirilir (Holloway ve diğerleri, 2012). Elde edilen bu S-parametrelerinden (S₁₁ ve S₂₁), metayüzeyin etkin kırılma indisi ve empedans gibi temel parametrelerini hesaplamak için, literatürde yaygın olarak kullanılan ve dal (branch) belirsizliklerini ortadan kaldıran sağlam (robust) geri kazanım algoritmaları geliştirilmiştir (X. Chen, Grzegorzcyk, Wu, Pacheco ve Kong, 2004). Bu ölçüm ve hesaplama süreci, tasarlanan yapının simülasyon sonuçlarıyla deneysel verilerinin örtüştüğünü kanıtlamak için zorunludur.

8. Sonuç

Bu çalışmada metayüzeylerin sınıflandırılması, temel elektromanyetik teorisi, RF uygulamaları, üretim teknikleri ve gelecek eğilimleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Metayüzeylerin genel başarısı, meta-atomlar üzerinden genlik, faz ve polarizasyon kontrolü sağlamalarından kaynaklanmaktadır; Huygens metayüzeleri gibi teorik çerçeveler ve genelleştirilmiş Snell yasası, dalga manipülasyonunun temelini sunar. Uygulama alanlarında, 5G mmWave haberleşmeden çoklu hedefli iletişim ve temassız sensöre kadar pek çok örnekle metayüzeylerin pratik değeri vurgulanmıştır. Üretim teknikleri ve yeniden yapılandırılabilir platformlardaki ilerlemeler, metayüzelerin esnek ve entegre cihazlar olarak kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Güvenlik ve gizlilik konularındaki potansiyel riskler ise bu teknolojinin etik kullanımı açısından dikkatle değerlendirilmelidir.

Geleceğe yönelik bakış açısı, metayüzelerin yalnızca performans hedeflerine göre değil aynı zamanda yapısal tasarıma giden sistematik bir yol haritası ile geliştirileceğini öngörmektedir. 2025 yılında yayımlanan kapsamlı bir inceleme, görüntüleme uygulamaları özelinde “performanstan yapıya” adlı yeni bir tasarım paradigması önererek temel görüntüleme gereksinimlerini elektromanyetik cevaplara, ardından bu cevapları özel metayüzey mikro yapılarının tasarımına dönüştürmeyi önermiştir; inceleme, yapay zekânın ters tasarım sürecini hızlandırmada ve görüntüleme performansını artırmada merkezi bir rol

oynadığını vurgulamış ve dokuz ana araştırma yönünü (uçtan uca tasarım, çok amaçlı tasarım, üretim odaklı tasarım, hızlı çözücü destekli tasarım, büyük alanlı tasarım, metayüzey dizi tasarımı, kaskadlı metayüzey tasarımı, dinamik ayarlanabilir metayüzeler ve hibrit optik-metayüz tasarımı) tanımlamıştır(Zeng, Zhong, Long, Cao ve Jin, 2025). Bu değerlendirme, metayüzelerin gelecekte hem hesaplamalı hem de fiziksel düzeyde yapay zekâ ile bütünleşerek çok çeşitli uygulamalarda devrim yaratacağına işaret etmektedir.

Referanslar

- Bukhari, S. S., Vardaxoglou, J. (Yiannis) ve Whittow, W. (2019). A Metasurfaces Review: Definitions and Applications. *Applied Sciences*, 9(13), 2727. doi:10.3390/app9132727
- Chen, M., Kim, M., Wong, A. M. H. ve Eleftheriades, G. V. (2018). Huygens' metasurfaces from microwaves to optics: A review. *Nanophotonics*, 7(6), 1207-1231. doi:10.1515/nanoph-2017-0117
- Chen, X., Grzegorzczak, T. M., Wu, B.-I., Pacheco, J. ve Kong, J. A. (2004). Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials. *Physical Review E*, 70(1), 016608. doi:10.1103/PhysRevE.70.016608
- Cui, T. J., Qi, M. Q., Wan, X., Zhao, J. ve Cheng, Q. (2014). Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials. *Light: Science & Applications*, 3(10), e218-e218. doi:10.1038/lsa.2014.99
- Cui, T. J., Qi, M. Q., Wan, X., Zhao, J. ve Cheng, Q. (2014). Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials. *Light: Science & Applications*, 3(10), e218-e218. doi:10.1038/lsa.2014.99
- Della Giovampaola, C. ve Engheta, N. (2014). Digital metamaterials. *Nature Materials*, 13(12), 1115-1121. doi:10.1038/nmat4082
- Di Renzo, M., Zappone, A., Debbah, M., Alouini, M.-S., Yuen, C., de Rosny, J. ve Tretyakov, S. (2020). Smart Radio Environments Empowered by Reconfigurable Intelligent Surfaces: How It Works, State of Research, and The Road Ahead. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 38(11), 2450-2525. doi:10.1109/JSAC.2020.3007211
- Ding, T., Fang, L., Liu, L., Chen, P., Xie, J. ve Zhang, H. (2025). Design of an Ultrawide-Angle Programmable Metasurface Based on Hexagonal Grid for 5G Millimeter-Wave Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 24(10), 3764-3768. doi:10.1109/LAWP.2025.3603886
- Eardprab, S. ve Chanadee, C. (2021). Implementation of RF Energy Harvesting System with Efficiency Improvement by Using Metamaterials. *2021 7th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST)* içinde (ss. 209-212). 2021 7th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST), sunulmuş bildiri. doi:10.1109/ICEAST52143.2021.9426284
- Fano, U. (1941). The Theory of Anomalous Diffraction Gratings and of Quasi-Stationary Waves on Metallic Surfaces (Sommerfeld's Waves). *JOSA*, 31(3), 213-222. doi:10.1364/JOSA.31.000213
- Glybovski, S. B., Tretyakov, S. A., Belov, P. A., Kivshar, Y. S. ve Simovski, C. R. (2016). Metasurfaces: From microwaves to visible. *Physics Reports*,

- Metasurfaces: From microwaves to visible, 634, 1-72.
doi:10.1016/j.physrep.2016.04.004
- Guan, R., Xu, H., Lou, Z., Zhao, Z. ve Wang, L. (2024). Design and Development of Metasurface Materials for Enhancing Photodetector Properties. *Advanced Science*, 11(34), 2402530. doi:10.1002/adv.202402530
- Gutiérrez, C. E. ve Sabra, A. (2025, 18 Temmuz). Generalized Snell's law and Maxwell equations. arXiv. doi:10.48550/arXiv.2305.01081
- Holloway, C. L., Kuester, E. F., Gordon, J. A., O'Hara, J., Booth, J. ve Smith, D. R. (2012). An Overview of the Theory and Applications of Metasurfaces: The Two-Dimensional Equivalents of Metamaterials. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 54(2), 10-35. doi:10.1109/MAP.2012.6230714
- Hu, J., Bandyopadhyay, S., Liu, Y. ve Shao, L. (2021). A Review on Metasurface: From Principle to Smart Metadevices. *Frontiers in Physics*, 8. doi:10.3389/fphy.2020.586087
- Hu, W. S., Liu, Y. H., Gong, C. Y., Wang, S. Y. ve Li, Y. B. (2023). Dual-Frequency Co-Aperture Control of Beam Scanning by Programmable Metasurface. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 22(12), 3013-3017. doi:10.1109/LAWP.2023.3308935
- Kumar, D. S., Pavithra, S., Ranjith, K. S., Kiruthika, R. ve Kavın, E. (2023). Design and Investigation of Metamaterial Antenna for Wireless Communication. *2023 7th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)* içinde (ss. 1464-1468). 2023 7th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), sunulmuş bildiri. doi:10.1109/ICECA58529.2023.10395476
- Landy, N. I., Sajuyigbe, S., Mock, J. J., Smith, D. R. ve Padilla, W. J. (2008). Perfect Metamaterial Absorber. *Physical Review Letters*, 100(20), 207402. doi:10.1103/PhysRevLett.100.207402
- Liu, C., Yang, F., Xu, S. ve Li, M. (2023). Reconfigurable Metasurface: A Systematic Categorization and Recent Advances. *Electromagnetic Science*, 1(4), 1-23. doi:10.23919/emsci.2023.0002
- Mackay, A., Sanz-Izquierdo, B. ve Parker, E. A. (2014). Evolution of Frequency Selective Surfaces.
- Malkoç, M., Ünalı, S. ve Çimen, S. (2025). Low-Cost Transmitarray Design with High Gain Bandwidth and Suppressed SLL. *Electronics*, 14(20), 4044. doi:10.3390/electronics14204044
- Malkoç, Muhammed. (2024). *X ve Ka Bant Uygulamaları için Yüksek Kazanç Bant Genişliğine Sahip İletici Dizi Anten Tasarımları*. (Yayımlanmamış master's thesis). Bilecik Şeyh Edebali University, Bilecik, Turkey.

- Malkoç, Muhammed, Ünalı, S., ve Çimen, S. (2024). Low Profile mm-Wave Transmitarray Design for 5G Applications. *Proceedings of the 5th International Congress on Contemporary Scientific Research (ICCSR)* içinde . 5th International Congress on Contemporary Scientific Research (ICCSR), sunulmuş bildiri, Kayseri, Turkey.
- Manikandan, P., Pushpavanam, B., Swedheetha, C., Naveen, P., Akilan, T. ve Muneeswaran, V. (2023). Literature Review: Metamaterials in RF and Microwave Applications. *2023 5th International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICAC3N)* içinde (ss. 1228-1233). 2023 5th International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICAC3N), sunulmuş bildiri. doi:10.1109/ICAC3N60023.2023.10541385
- Martín, F. (2012). Metamaterials for Wireless Communications, Radiofrequency Identification, and Sensors. *International Scholarly Research Notices*, 2012(1), 780232. doi:10.5402/2012/780232
- Monticone, F. ve Alù, A. (2017). Metamaterial, plasmonic and nanophotonic devices. *Reports on Progress in Physics*, 80(3), 036401. doi:10.1088/1361-6633/aa518f
- Qu, M., Lan, T., Su, J., Zuo, P. ve Song, J. (2024). Generation of Discrete Nondiffractive Beams Based on Programmable Metasurface for Multitarget Communications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 72(12), 6799-6808. doi:10.1109/TMTT.2024.3405191
- Quan, J., Zhou, Q., Cao, Y. ve Xu, Y. (2022). Understanding of Wood Anomalies in Metallic Gratings From Phase Gradient Metasurfaces. *Frontiers in Materials*, 9. doi:10.3389/fmats.2022.901794
- Rayleigh, Lord. (1907). On the Dynamical Theory of Gratings. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 79(532), 399-416.
- Tzarouchis, D. C., Koutsoupidou, M., Sotiriou, I., Dovelos, K., Rompolas, D. ve Kosmas, P. (2024). Electromagnetic metamaterials for biomedical applications: Short review and trends. *EPJ Applied Metamaterials*, 11, 7. doi:10.1051/epjam/2024006
- Wood, R. W. (1902). On a Remarkable Case of Uneven Distribution of Light in a Diffraction Grating Spectrum. *Proceedings of the Physical Society of London*, 18(1), 269. doi:10.1088/1478-7814/18/1/325
- Yu, N. ve Capasso, F. (2014). Flat optics with designer metasurfaces. *Nature Materials*, 13(2), 139-150. doi:10.1038/nmat3839
- Yu, N., Genevet, P., Kats, M. A., Aieta, F., Tetienne, J.-P., Capasso, F. ve Gaburro, Z. (2011). Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws

- of Reflection and Refraction. *Science*, 334(6054), 333-337. doi:10.1126/science.1210713
- Zeng, Y., Zhong, H., Long, Z., Cao, H. ve Jin, X. (2025). From performance to structure: A comprehensive survey of advanced metasurface design for next-generation imaging. *Npj Nanophotonics*, 2(1), 39. doi:10.1038/s44310-025-00081-6
- Zhang, L., Chen, X. Q., Liu, S., Zhang, Q., Zhao, J., Dai, J. Y., ... Cui, T. J. (2018). Space-time-coding digital metasurfaces. *Nature Communications*, 9(1), 4334. doi:10.1038/s41467-018-06802-0
- Zhang, X. G., Tang, W. X., Jiang, W. X., Bai, G. D., Tang, J., Bai, L., ... Cui, T. J. (2018). Light-Controllable Digital Coding Metasurfaces. *Advanced Science*, 5(11), 1801028. doi:10.1002/advs.201801028
- Zhou, Q. Y., Sun, Y., Ma, J., Chen, Y., Wang, Z. J., Wang, S. R., ... Cheng, Q. (2025). Multiperson Respiration Detection: A Digital Programmable Metasurface Analysis Approach. *IEEE Internet of Things Journal*, 12(18), 39116-39129. doi:10.1109/JIOT.2025.3587995
- Zhu, L., Han, J., Li, G., Ma, X., Xia, D., Zheng, Z., ... Li, L. (2024). Dual Linearly Polarized 2-bit Programmable Metasurface With High Cross-Polarization Discrimination. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 72(2), 1510-1520. doi:10.1109/TAP.2023.3345034

BÖLÜM 14

Geleneksel Ürün Adı ve Mahreç İşareti ile Tescillenen Gıdaların Üretiminde Kullanılan Ekipmanların Gıdaya Temasa Uygunluğu

Sibel Özçakmak¹

¹ Doç. Dr., Atakum İlçe Tarım ve Orman Müdürlüğü, Gıda Kontrol Birimi, Atakum/Samsun; Gedik Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi Beslenme ve Diyetetik Bölümü, Yöresel Ürünler ve Coğrafi İşaretler Türkiye Araştırma Ağı (YÜciTA) Aktif Üyesi, ORCID NO: 0000-0001-9426-0919

1. GİRİŞ

Piyasaya arz edilen gıdaların birincil üretimden başlayan tedarik zincirinde gıdanın temas ettiği madde ve malzemelerin teknik ve hijyen gereklilikleri, gıda güvenilirliği açısından kritik öneme sahip, tüketici sağlığını doğrudan etkileyen önemli bir parametredir. Bu malzemeler, hijyen gerekliliklerini sağlamalı, gıdanın bileşiminde ve/veya duyuşsal özelliklerinde istenmeyen değişimlere/bozulmalara neden olmamalı, insan sağlığını tehlikeye sokacak herhangi bir madde/bileşen içermemeli/geçirgenliği olmamalıdır (TGK, 2018).

Geleneksel ve modern mutfak uygulamalarında sıkça kullanılan bakır, alüminyum ve ahşap gereçler; fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik açıdan farklı risk ve avantajlar barındırmaktadır. Bu durum, özellikle metal ve organik esaslı gereçler olan bakır, alüminyum ve ahşap kaplar açısından dikkatle değerlendirilmelidir (EFSA, 2019a). Günümüzde mutfak kaplarında kullanılan başlıca metaller arasında demir, alüminyum, bakır, kalay (Sn), nikel ve krom yer almaktadır. Bu metallerden bazıları, özellikle asidik gıdalarla temas hâlinde çözünerek gıdaya geçiş yapabilmekte ve uzun vadede toksik etkilere neden olabilmektedir (EFSA, 2019b; WHO, 2021). Bakır ve alüminyumun yüksek ısı iletkenlikleri nedeniyle avantajlı olmakla birlikte, kaplama veya oksidasyon koruması olmaksızın doğrudan temas ettiklerinde gıdaya metal iyonu geçişi oluşturabildiklerini göstermektedir. Ahşap materyaller ise kimyasal geçiş açısından güvenli görünmekle birlikte, mikrobiyal kontaminasyon riski taşımaktadır (Pilip, S., Fink, R., Oder, M. & Jevs'nik, M., 2012). Bu malzemelerin kontrollü, mevzuata uygun ve düzenli bakımla kullanımı gıda güvenliği açısından önem arz etmektedir (Çekal & Doğan, 2021).

Türk mutfak kültüründe bakır, alüminyum ve ahşap kaplar, geleneksel pişirme ekipmanları arasında önemli bir yere sahiptir. Osmanlı Saray Mutfağı'nda metal kaplar, ateşi homojen şekilde iletmesinden dolayı yemeklerin dengeli pişirilmesi için ideal bir çözüm olarak kullanılmıştır. Metal kap sınıfında ele alınabilecek olan bakır (Cu) kaplar, Osmanlıda kullanımı en yaygın olan, tarih boyunca yüksek ısı iletkenliği nedeni ile yemeklerin daha hızlı pişmesini sağlaması ve estetik görünümü nedeniyle mutfak gereçlerinde, özellikle pişirme ekipmanlarının üretiminde sıklıkla tercih edilmektedir (Verissimo, C., Oliveira, C. & Gomes, A., 2005; Ak, 2007; Teyin & Nizamlioğlu, 2021). Günümüzde bakırdan yapılan büyük ısıtma kazanları dünya çapında büyük markaların süt, şarap, veya peynir gibi ürünlerinin imalatında kullanılmaktadır. Bununla birlikte Osmanlı mutfağının konu edildiği tüm etkinliklerde uluslararası otellerde bakırdan yapılan mutfak eşyalarının kullanımı oldukça popüler durumdadır. Ayrıca ülkelerin yerel mutfaklarında bakırdan yapılan gereçler ile pişirilen çok sayıda yemek bulunmaktadır (Karaosmanoğlu, 2010; Çekal & Doğan, 2021).

Tarihsel süreçte insanlar, mutfaklarda toprak, seramik, bakır ve bronz gibi farklı materyallerden üretilmiş kaplar kullanmışlardır. Ağır metaller, elementlerin atomik ağırlıklarına bakılmaksızın tüm toksik özelliği taşıyan metaller olarak tanımlanır. Altmıştan fazla element ağır metallere örnek olarak verilebilse de en sık rastlanan ve en çok tanınanlar Civa (Hg), Mangan (Mn), Demir (Fe), Kobalt (Co), Nikel (Ni), Bakır (Cu), Çinko (Zn), Kadmiyum (Cd), Arsenik (As), Krom (Sn), Kurşun (Pb), Gümüş (Ag) ve Selenyum (Se)' dur (Özbolat ve Tuli, 2016). Toksikolojik değerlendirmeler, pişirme kapları olarak kullanılan bazı metal mutfak gereçlerinin ağır metal migrasyonu yoluyla gıdaya kontaminasyon riski oluşturabileceğini göstermiştir. Bakırın gıda ile teması yolu ile uzun süreli tüketiminde midede bakır toksisitesi riski, alüminyumun uzun vadede unutkanlık, alzheimer vb. nörolojik problemlere yol açtığı bildirilmiştir (Elveren & Osman, 2021; Koontz J.L., Liggans G.V. & Redan B.W., 2020; Arıcan, 2021; WHO, 2021). Arıcan (2021), yaptığı bir araştırmada özellikle pişirme sürecinde kullanılan alüminyum ve bakır tencerelerde, tava ve çaydanlıktan önemli ölçüde daha fazla Al ve Cu metallerinin besinlere geçebileceğini tespit etmiştir.

Alüminyum kapların asitli ve tuzlu gıdalarda kullanımı, alüminyum migrasyonunu arttırdığı, alüminyumun gıdaya geçiş miktarının 5 mg/kg'ı aşması halinde nörotoksik etkilere ve Alzheimer hastalığı ile ilişkili nörodejeneratif değişimlere neden olabileceği rapor edilmiştir (Krewski, D., Yokel, R.A., Nieber, E., Borchelt, D., Cohen, J., Harry, J., Kacew, S., Lindsay, J., Mahfouz, A.M. & Roundeau, U., 2007; EAA, 2018; EFSA, 2020; Yorulmaz & Tuncel 2020).

Ahşap, yenilenebilir, doğal ve geleneksel bir gıda temas materyali olarak insanlık tarihi boyunca kullanılmaktadır. Özellikle hamur tahtaları, kepçeler, servis kaseleri ve peynir yapım kalıpları gibi ürünlerde yaygın şekilde yer alır. Ancak ahşabın gözenekli yapısı, mikroorganizma tutulumuna ve nemli ortamlarda mikrobiyal üremeye zemin hazırlayabilir (Veríssimo & Gomes, 2005). Bu nedenle ahşap gereçlerin hijyenik olarak temizlenmesi ve kurutulması büyük önem taşır. Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi, gıda ile temas eden ahşap materyallerin ancak yüzey işlemi uygulanmış, katkısız ve gıda sınıfı yağ veya balmumu ile korunmuş olması koşuluyla güvenli olduğunu belirtmektedir (EFSA, 2019a).

Geleneksel ürün Avrupa Birliği (AB) mevzuatına göre (2082/92 no'lu yönetmelik çerçevesinde) geleneksel hammaddeler kullanılarak üretilen veya geleneksel bir kompozisyonla karakterize edilen veya geleneksel bir üretim tipini yansıtan işleme yöntemiyle üretilen ürünlerden oluşmaktadır (Vasilopoulou, E.V., Dilis, S., Soukara, A. & Trichopoulou, A., 2005). Geleneksel ürünler özünde; kültür, tarih ve yaşam tarzını anlatırlar. Bunun yanı sıra üretiminde kullanılan geleneksel üretim yöntemleri ve hammaddeleri ile geleneksel bir

karaktere sahip olan ve bu özellikleri nedeniyle farklı yörelerde üretilen benzerlerinden farklılaşan ürünlerdir.

TGK Gıda Etiketleme ve Tüketicileri Bilgilendirme Yönetmeliği Hakkında yayınlanan Kılavuza göre (TGK, 2021) bir ürünün tanımlanmasında “Geleneksel” teriminin kullanılabilmesi için; belirli gıdalara veya gıda gruplarına yönelik olarak yayımlanan dikey gıda kodeksinde tanımlanmış olması, (Geleneksel reçel) veya Türk Patent ve Marka Kurumu tarafından tescillenmiş olması gerekir. Coğrafi işaret kapsamına girmeyen ve bir ürünü tarif etmek için geleneksel olarak en az otuz yıl süreyle kullanıldığı kanıtlanan adlar, Geleneksel üretim veya işleme yöntemi yahut geleneksel bileşimden kaynaklanması veya Geleneksel hammadde veya malzemeden üretilmiş olması şartlarından en az birini sağlaması hâlinde geleneksel ürün adı olarak tanımlanabilmektedir. İthal edilen geleneksel gıdalar için o gıdanın ithal edildiği ülkede geleneksel ürün adı olduğunu gösteren resmi belgeler geçerli olmaktadır.

Bu çalışmada, geleneksel ürün adı ve Mahreç İşareti ile tescillenen reçel, pekmez, turşu ve salça üretiminde kullanılan alet-ekipmanlar incelenmiş, ahşap, bakır ve alüminyum ekipmanların kullanımı ve gıda hijyen uygulamaları ve yasal mevzuat açısından tescil belgelerindeki kriterler hakkında değerlendirme yapılması amaçlanmıştır.

2. GELENEKSEL ÜRÜN ADI İLE TESCİLLENEN VE TESCİL BAŞVURUSUNDA BULUNAN GIDALAR VE ÜRETİMDE KULLANILAN ALET-EKİPMANLAR

Türkiye’de geleneksel ürün adı ile tescilli ürünlerin bilgileri, TÜRKPATENT (TÜRKPATENT, 2025) Coğrafi İşaretler ve Geleneksel Ürün adları Portalında yer alan veri tabanından (<https://ci.turkpatent.gov.tr/veri-tabani>) elde edilmiştir. Veriler, tek tek incelenerek kontrolleri sağlanmış, araştırma amacı doğrultusunda gerekli olanlar bilgisayar ortamında oluşturulan tablolara aktarılmış ve içerik analizi yapılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda; Geleneksel Ürün adı ile 17 adet başvuru aşamasında, 7 adet tescillenmiş* olmak üzere toplam 24 çeşit gıda bulunduğu belirlenmiştir (TÜRKPATENT, 2025). Bunlar; Adıyaman Köy Peyniri, Akide Şekeri, Ayvalık Tostu*, Begonvil Reçeli, Denizli Tandır Kebabı*, Döner*, Ezo Gelin Çorbası*, Fatsa Fındığı, Geleneksel Baklava / Türk Baklavası, Güllaç, Karayemiş Kurusu, Kaynana Zırılıtsı, Kürt Böreği, Kız Papası, Puşut Unu, Sirkencübin/Sirkengebin*, Türk Kahvesi, Türk Lokumu, Yer fıstıklı çiğ köfte, Yoğurt, Çakallı Menemeni*, İbrahim Usta Lezetli Adana Mermer Kebabı, İbrahim Usta Mermer Kebabı ve Şevketi Bostan/Şevket-i Bostan*’dır. Geleneksel ürün adı ile tescillenen ürünlerin üretim metodlarında kullanılan ekipmanlar Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Geleneksel ürün adı ile tescillenen ürünlerin üretiminde kullanılan ekipmanlar ve denetim kriterleri

Ürün adı	Tescil tarihi-Tescil ettiren	Üretimde kullanılan alet-ekipmanlar ve gıda ile temasa uygunluk beyanı	Denetim kriteri olarak gıda ile temas eden madde/malzemelerin uygunluğuna yer verilmiş mi?
Geleneksel ürün adı ile tescillenen ürünler (n=7)			
Ezo gelin çorbası	10.09.2020/ Oğuzeli Belediyesi	Tencere-malzeme özelliği belirtilmemiş.	Üretim metoduna uygunluk olarak belirtilmiştir.
Denizli Tandır kebabı	08.10.2020/ Denizli Ticaret Borsası	Demir şiş, kalaylanmış iki adet bakır tava* ¹ .	
Çakallı menemeni	25.02.2020/ Samsun Ticaret Borsası	Tava (malzeme özelliği belirtilmemiş).	
Döner	09.12.2021/ Uluslararası Döner Fedarasyonu (UDOFED)	<i>Gıdaya temas edebilir özelliklerdeki makine ya da bıçaklar, döner bıçağı, şiş</i> * ² .	
Şevketi Bostan/ Şevket-i Bostan	11.08.2021/ Söke Ticaret Odası	Süzgeç, tencere (malzeme özelliği belirtilmemiş).	
Ayvalık tostı	27.01.2023/ Ayvalık Belediyesi	Dökme tost makinası, tepsi.	
Sirkencübin / Sirkengebin	16.07.2024/ Konya Büyükşehir Belediyesi	Karıştırma kabı (malzeme özelliği belirtilmemiş).	
AntalyaBergamot Kabuğu Reçeli	26.05.2021/ Antalya Ticaret ve Sanayi Odası	Pamuk ip, rende, kazan (malzeme özelliği belirtilmemiş), kavanoz.	
Antalya Turunç Kabuğu Reçeli	26.05.2021/ Antalya Ticaret ve Sanayi Odası	Pamuk ip, rende, tencere (malzeme özelliği belirtilmemiş), kavanoz.	
Gaziantep Haylan Kabağı reçeli	13.05.2024/ Gaziantep Büyükşehir Belediyesi	Rende,kayn atma işlemindeki malzeme belirtilmemiş, kavanoz.	Üretim metoduna uygunluk, Ambalajlama ve muhafaza koşullarının
Hatay Ceviz Reçeli	08.12.2021/ Antakya Ticaret ve Sanayi Odası	Ceviz kabuğu soyucusu, çatal, ham (firik) cevizlerin acı suyunun giderilmesi için bekletildiği kap, kireç	

		kaymağının hazırlandığı kap, cevizlerin kaynar su ile muamele edildiği kap, şerbetin hazırlandığı kazan, cam kavanoz.	uygunluk olarak belirtilmiştir.
İğdır Patlıcan Reçeli	20.12.2021/ İğdır İl Tarım ve Orman Müdürlüğü	Kabuk soyucu, patlıcanların tuzlu suda bekletildiği kap, kaynatma kazanı, süzgeç, kavanoz.	Ürünün, Türk Gıda Kodeksi Reçel, Jöle, Marmelat ve Tatlandırılmış Kestane Püresi Tebliğine uygun olarak üretileceği belirtilmiştir.

Tablo 2. Mahreç işareti ile tescillenen pekmez retiminde kullanılan alet ekipmanlar ve denetim kriterleri

Ürün adı	Tescil tarihi-Tescil ettiren	Üretimde kullanılan alet-ekipmanlar ve gıda ile temasa uygunluk beyanı	Denetim kriteri olarak gıda ile temas eden madde/malzemelerin uygunluğuna yer verilmiş mi?
Mahreç işareti ile tescillenen pekmezler (n=8)			
Andırın Andız Pekmezi	11.11.2022/ Kahramanmaraş Büyükşehir Belediyesi	Kozalakların kırılması için çekiç/makina, 'Mâsere' adı verilen bakır kazan (Bakır kazanlar kalaylı şekilde kullanılır)* ³	Evet. "Ürünün pişirildiği bakır kazanların kalayında aşınma olup olmadığı" şeklinde belirtilmiştir.
Antep Pekmezi/ Gaziantep Pekmezi	24.07.2020/Gaziantep Ticaret Borsası	Geleneksel yöntem: Üzümlerin yıkandığı plastik kasalar, paslanmaz çelikten süzekler, Üzüm salı, (üzümün ezilip suyunun çıkarılacağı tahtadan, yekpare taştan veya son zamanlarda betondan yapılan dikdörtgen bir havuz şeklindeki yapı), üzümleri tepelemedeki kişilerin kullandığı temiz-yıkanmış çizmeler, Mengene (kalın bir tahta sehpa üzerine ve vida yivli bir mil etrafına yerleştirilmiş, etrafı demir parmaklıklı, alt ve üstü açık bir silindir), Mengenenin özel düzeneği ile demir parmaklıklı silindir mekanizma, Mahzere kazanı (kaynatma işlemi için), kıvam kontrolü için kulplu tas, özel sıra faraşı (Şıra faraşı üzeri yarım kapalı galvanizli saçtan yapılan normal faraşlara benzer bir alettir), leğen,sık dokunmuş torbalar, kalaylı bakır kaplar , Mayalanmış olan pekmezin aktarıldığı tahta kutu veya teneke kutular. Modern Yöntem: Kuru üzümün geçirildiği kıyma makinesi, sap ayırma makinesi, ezme değirmeni, seperatör, vakum makinesi, Çırpma ve dövme işlemi yapan karıştırıcılar.	Üretim metoduna uygunluk olarak belirtilmiştir.
	28.07.2021/		

Belen Kömürçukuru Pekmezi	İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası	Ezme işlemi için “megene” denilen tahta tekne, sırası “lakın” denilen tabanı düz <i>kalaylı bakır leğenlerde</i> kaynatma.	Üretiminin her aşamasında gıda ile temasa uygun alet ve ekipman kullanılması gerektiği belirtilmiştir. ^{*4}
Düzce Şeker Kamışı Pekmezi	24.05.2021/ Düzce İl Tarım ve Orman Müdürlüğü	Presleme makinesi, süzgeç, tülbent, <i>bakır kaynatma kazanı</i> , karıştırıcı (özelligi belirtilmemiş), kepçe, plastik veya cam kaplar.	Üretim metoduna uygunluk olarak belirtilmiştir.
Karapürçek Cennet Hurması Pekmezi	8.05.2023/ Karapürçek Kaymakamlığı	Plastik kasalar, kazan, <i>Gıda ile temasa uygun</i> ^{*5} file çuval, şıranın toplandığı kap, paslanmaz çelik açık kazan, cam kavanoz.	
Senirkent Üzüm Pekmezi	17.03.2022/Senirkent Belediyesi	Geniş gözenekli çuvalar, Ezme işlemi için Hatıl, temiz çizmeler (ezerek şıranın çıkarılması için), <i>geniş bakır kazanlar</i> , pekmez toprağı, süzgeç, <i>Gıda ile temasa uygun tahta bir kaşık</i> , temiz sırcalı çömlek ya da cam kavanozlar.	
Sivan Dut Pekmezi	27.01.2021/ Bingöl İl Tarım ve Orman Müdürlüğü	Hasat aşamasında çadır veya bez kumaşlar, <i>gıdayla teması uygun olan tahta kaşık</i> , kaynatma kazanı (özelligi belirtilmemiş), bez çuval, yabani söğüt ağacının ince dallarından yapılmış sepetler, şıranın süzülmesi için elek veya tülbent, kaynatma kazanı, dinlendirme için geniş ağızlı yayvan kaplar (özelligi belirtilmemiş), tülbent bez.	
Şıran Kök Pekmezi	11.03.2024/ Kelkit Ticaret ve Sanayi Odası	Geleneksel üretim: Sert fırça, bıçak ya da herhangi bir kesici alet, kazan, elek ve tülbent, Endüstriyel üretim: yıkama havuzları, sert fırça, meyve kıyma makinası, modern presler (şıra ayrılması için), ince filtreler, vakum evaporatörü, cam kavanoz, tahta külek, plastik veya tenek ambalajlar.	

Tablo 3. Mahreç işareti ile tescillenen turşu retiminde kullanılan alet ekipmanlar ve denetim kriterleri

Ürün adı	Tescil tarihi-Tescil ettiren	Üretimde kullanılan alet-ekipmanlar ve gıda ile temasa uygunluk beyanı	Denetim kriteri olarak gıda ile temas eden madde/malzemelerin uygunluğuna yer verilmiş mi?
<i>Mahreç işareti ile tescillenen turşular (n=11)</i>			
Gaziantep Acur-Biber Turşusu	31.03.2022/Gaziantep Büyükşehir Belediyesi	<i>Gıda ile temasa uygun</i> ^{*6} cam ya da plastik kavanozlar	Üretim metoduna uygunluk olarak belirtilmiş.
Midyat Turşusu/ Midyat Acur Turşusu	01.06.2022/Midyat Belediyesi	Dolum kabı olarak belirtilmiş (Şişe)	
Muş Çorti Turşusu	25.12.2017/Muş İl Sanayi ve Teknoloji Müdürlüğü	Dolum kabı olarak belirtilmiş (Kavanoz)	
Ordu Taflan Turşusu	10.05.2022/ Ordu Büyükşehir Belediyesi	<i>Gıda ile temasa uygun</i> ^{*7} bir kap.	
Ordu Yayla Pancarı Turşusu/Ordu Dürme Turşusu	15.12.2017/Kabadüz Belediyesi	Dolum kabı olarak belirtilmiş (Plastik bidonlar)	
Orhangazi Gedelek Turşusu	04.12.2017/Orhangazi Ticaret ve Sanayi Odası	Dolum kabı olarak belirtilmiş (Fıçı, varil veya daha büyük hacimli olan kaplar)	
Osmancık Kapari Turşusu	04.09.2024/Osmancık Kaymakamlığı	Seçme-sınıflandırma-ayıklama işlemlerinde kullanılan ekipmanlar belirtilmemiş, yıkama yapılan yer, parçalayıcı, haşlama kazanı, fıçı, varil veya daha büyük hacimli olan kaplar	
Reşadiye Kırmızı Pezik Turşusu	21.08.2023/Reşadiye Belediyesi	Kesme-dilimleme ve boyut küçültme işleminde kullanılan alet, haşlama kazanı, cam veya plastik kaplar	
Sivas Pezik Turşusu/ Sivas Pezik Dal Turşusu	12.03.2020/Sivas Ticaret ve Sanayi Odası	Haşlama kazanı, soğutma kazanı, turşunun dolum yapıldığı kaplar	
Çubuk Turşusu	26.08.2008/Çubuk Belediyesi	Ön yıkama tankı, elek, kabuk soyma ve iç temizleme (çekirdek çıkarma), Haşlama kazanı, fermantasyon sürecinde kullanılan fiçiler, plastik, cam kavanoz, veya <i>paslanmaz teneke dolum kapları</i> ^{*8}	

İskilip Turşusu	19.04.2010/İskilip Belediyesi	Salamura kabı, ağırlık, sirkeleme aşamasında pişmiş kilden yapılmış ve içerisi sırta kaplanmış ortası geniş altı ve üstü dar olan toprak küpler	
--------------------	----------------------------------	---	--

Tablo 4. Mahreç işareti ile tescillenen salça üretiminde kullanılan alet ekipmanlar ve özellikleri

Ürün adı	Tescil tarihi-Tescil ettiren	Üretimde kullanılan alet-ekipmanlar ve gıda ile temasa uygunluk beyanı	Denetim kriteri olarak gıda ile temas eden madde/malzemelerin uygunluğuna yer verilmiş mi?
<i>Mahreç işareti ile tescillenen salçalar (n=2)</i>			
Antep Biber Salçası/ Gaziantep Biber Salçası, Hatay Biber Salçası	14.09.2022/ Gaziantep Ticaret Borsası	Elevatör, paslanmaz çelikten yapılmış yüksek devirde dönen iki silindirden oluşan patlatma ünitesi, yıkama tamburu, ayıklama bandı, kırıcılar ve şıra (pulplu biber ezmesi) vazosu, ısıtma kazanı, vakum altında çift cidarlı “bull” buharlaştırıcılar, pastörizatör, <i>gıda ile temasa uygun olan ısıya dayanıklı kaplar</i> ⁹ .	Üretim metoduna uygunluk olarak belirtilmiş.
Hatay Biber Salçası	04.11.2024/Antakya Ticaret ve Sanayi Odası	Yıkama ve ayıklama bölümü, biberin patlatıldığı yüksek devirde dönen iki silindir, kurutma için temiz bezlerin veya brandalar, boyut küçültme için kıyma makinesinden veya kırıcılar, tüplü (borulu) pastörizatör, <i>gıda ile temasa uygun olan ısıya dayanıklı</i> ¹⁰ (sıcak dolum yapılabilen) kaplar.	

Tablo 1-4’de 28 adet Geleneksel Ürün Adı ve Mahreç İşareti ile tescillenen reçel, pekmez, turşu ve salça üretiminde kullanılan alet-ekipmanlar ve özellikleri sunulmuştur. Buna göre; 10 adet (%35.71) ürünün üretiminde kullanılan ekipmanların niteliğinin belirtildiği görülmüştür. Geleneksel ürün adı ile tescillenen 7 ürünün 3’ünde (%28.57; Denizli Tandır Kebabı, Döner ve Iğdır Patlıcan Reçeli), Mahreç İşareti ile tescillenen 8 pekmez çeşidi ürünün 2’sinde (%25; Andız Pekmezi ve Belen Kömürçukuru Pekmezi), 11 turşu çeşidinin 3’ünde (%27.27; Gaziantep Acır-Biber Turşusu, Ordu Taflan Turşusu, Çubuk turşusu), 2 salça çeşidi (%100; Antep Biber Salçası/ Gaziantep Biber Salçası, Hatay Biber Salçası) üretiminde gıda ile temasa uygun madde/malzeme kullanımına uygunluğunun dikkate alındığı görülmüştür.

YASAL MEVZUAT

Gıda ile doğrudan ya da dolaylı olarak temas eden veya temas etmesi beklenen madde ve malzemelerin; insan sağlığının yüksek seviyede korunmasının sağlanması ve tüketici çıkarının korunması da dikkate alınarak, üretim, işleme ve dağıtımın tüm aşamalarındaki özelliklerini belirlemek amacı ile yasal düzenlemeler yapılmıştır. Gıda ile Temas Eden Madde ve Malzemeler Hakkında Avrupa Parlamentosu ve Konseyi Tüzüğü dikkate alınarak Avrupa Birliği mevzuatına uyum çerçevesinde hazırlanan Yönetmelikler Tablo 5’de gösterilmiştir.

Tablo 5. Gıda ile temas eden madde ve malzemeler ile ilgili yayınlanan mevzuatlar

Yönetmelik adı	Tarih ve Resmi Gazete Sayısı	Dayanak
Türk Gıda Kodeksi (TGK) Gıda ile Temas Eden Madde ve Malzemeler Yönetmeliği (TGK, 2011)	29.12. 2011/28157 (3. Mükerrer)	11/6/2010 tarihli ve 5996 sayılı Veteriner Hizmetleri, Bitki Sağlığı, Gıda ve Yem Kanununun 23 ve 24 üncü maddeleri, 1935/2004/EC sayılı Gıda ile Temas Eden Madde ve Malzemeler Hakkında Avrupa Parlamentosu ve Konseyi Tüzüğü
TGK Gıda ile Temas Eden Madde ve Malzemeler Yönetmeliği (TGK, 2018)	05.04.2018/ 30382	11/6/2010 tarihli ve 5996 sayılı Veteriner Hizmetleri, Bitki Sağlığı, Gıda ve Yem Kanununun 23 üncü, 24 üncü ve 26 ncı maddeleri
TGK Gıda ile Temas Eden Plastik Madde ve Malzemelerin Bileşenlerinin Migrasyon Testinde Kullanılan Gıda Benzerleri Listesi Tebliği (Tebliğ No: 2019/44) (TGK, 2019)	25.12.2019/30989 (Mükerrer)	29/12/2011 tarihli ve 28157 3. Mükerrer sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan TGK Yönetmeliği ve 5/4/2018 tarihli ve 30382 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan TGK Gıda ile Temas Eden Madde ve Malzemelere Dair Yönetmeliği, 10/2011/EU sayılı Avrupa Birliği (AB) mevzuatı.
TGK Gıda ile Temas Eden Plastik Madde ve Malzemeler Tebliği (Tebliğ No: 2019/44)’nde Değişiklik Yapılmasına Dair Tebliğ (Tebliğ No: 2023/33) (TGK, 2023a)	06.05.2024/32538	5/12/2019 tarihli ve 30989 mükerrer sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan Türk Gıda Kodeksi Gıda ile Temas Eden Plastik Madde ve Malzemeler Tebliği (Tebliğ No: 2019/44)
TGK Bulaşanlar Yönetmeliği (TGK, 2023b)	05.11.2023/32360	11/6/2010 tarihli ve 5996 sayılı Veteriner Hizmetleri, Bitki Sağlığı, Gıda ve Yem Kanununun 22, 23 ve 24 üncü maddeleri.

Gıda işletmecileri; gıdaların işlenmesi, üretim, işleme ve dağıtımın tüm aşamalarında kullanılan gıda ile doğrudan ya da dolaylı olarak temas eden veya temas etmesi beklenen madde ve malzemelerin; insan sağlığını koruyan, gıdanın

bileşiminde istenmeyen değişimlere neden olmayan, duyuşal özelliklerinde bozulmaya neden olabilecek düzeylerde geçiş olmayan niteliklerde ve yasal mevzuatlarda belirtilen şartlara uygunluğundan sorumludur.

2.1. Ahşap Esaslı Madde ve Malzemelerin Mevzuattaki Yeri ve Kullanımında Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar

Ahşap ambalaj hammaddesi odun olan özellikle ürünlerin taşınma ve depolanmasında kullanılan üçüncül ambalajlardır. En eski ambalaj malzemelerinden biri olan ahşap, hava alan yapıya sahip olması nedeniyle taze meyve ve sebzelerin taşınmasında kullanılmaktadır. Ahşap materyal çoğunlukla birden fazla kullanılabilmesi ve ucuz olması sebebiyle özellikle gıda sektöründe sıklıkla tercih edilmektedir. Ahşap kapların kullanımına ilişkin tercihler gıda güvenliği, ürünün geleneksel niteliği ve duyuşal beklentiler gibi faktörlere göre değişir (Aşıkkutlu, 201). Modern endüstride hijyen gereklilikleri nedeniyle yüksek riskli alanlarda sınırlamalar bulunsu da, ahşap malzeme kullanım geleneksel üretim yöntemlerinde (fermente süt ürünleri, fermente et ve balık ürünleri, fermente bitkisel ürünler, sirke, fermente içecekler, bal, pekmez, ekmek üretimi, kuru gıdaların muhafazası vb.) ve tescil ile korunan bazı ürün çeşitlerinde (peynir, pekmez, reçel, sirke, bira, şarap, turşu, yayık vb.) ahşap kaplar/ahşap yüzeyler geçmişten günümüze kullanımı tercih edilen malzemedir (Sezgin, A.C., Öztürk, B. & Kalaycı, D.B., 2019) .

Ahşap malzemelerin su emer nitelikte olması, mikrobiyolojik, fiziksel ve kimyasal riskleri artırdığı için iyi hijyen uygulamaları açısından dezavantajlıdır. Ahşabın gözenekli yapısı deterjan, dezenfektan ve sıcak suyun yüzeye homojen temasını engeller. Mikroorganizmalar yüzey çatlaklarında ve liflerde kimyasal dezenfeksiyondan korunabilir, bu nedenle patojenler iç tabakalarda kalabilir ve yüzeyin hijyen kontrollerinde yanıltıcı sonuçlar doğurabilir (Milling, A., Smalla, K., Kehr, R. & Wulf, A., 2005). Ahşap bazı türlerinde bulunan doğal reçineler, fenolik bileşikler veya işleme sırasında kullanılan vernik/koruyucu maddeler gıdaya geçebilir. Su ile temasta şişme ve kuruma sonrası büzülme görüldüğü için ahşap malzemeler zaman içinde çatlayabilirü kıymık oluşturabilir, maleme parçalanarak gıdada fiziksel kontaminasyona yol açabilir (Carpentier, 1997). Bu nedenle ıslak işlem yapılan üretim prosesleri ve temas süresinin uzun olduğı uygulamalarda paslanmaz çelik veya gıda ile direk temasa uygun kompozit malzemeler tercih edilmelidir (Aviat, F., Gerhards, C., Rodriguez-Jerez, J.J., Michel, V., Le Bayon, I., Ismail, R. & Federighi, M., 2016). Ahşap malzemelerin kullanımı halinde tercihen kuru gıdaların muhafazasında kullanımına, daha sık görsel kontrol, yüzey bütünlüğü izleme, kısa kullanım ömrü ve sık yenilemeye dikkat edilmelidir.

Ahşap malzemelerle ilgili yasal düzenlemeler incelendiğinde; TKG Gıda ile Temas Eden Madde ve Malzemeler Yönetmeliği'nde “Özel Mevzuatı Bulunan veya Özel Mevzuat Oluşturulması Planlanan Madde ve Malzeme Grupları”

arasında (TGK, 2018) yer aldığı görülmektedir. Dolayısı ile gıda işletmelerinde kullanımı yasal değil demek yanlış bir ifade olur.

Bununla birlikte, gıda işletmelerinin uyması gereken genel ve özel hijyen esaslarının belirlendiği “Gıda Hijyen Yönetmeliği”nde (RG, 2011) belirtilen koşulların (gıdanın muameleye tabi tutulduğu alanlardaki yüzeylerin ve özellikle ekipman yüzeyleri dahil gıda ile temas eden tüm yüzeylerin sağlam, kolay temizlenebilir ve gerekli durumlarda dezenfekte edilebilir, yüzeylerin pürüzsüz, su emmez nitelikte, *yıkanabilir*, korozyona dayanıklı ve toksik olmayan maddelerden üretilmiş olması) sağlanması gerekliliği unutulmamalıdır. Ahşabın su emme özelliği, mikroorganizmaların yüzeyde tutunmasına ve çoğalmasına zemin hazırlayarak mikrobiyolojik bulaşma riskini artırmaktadır. Ayrıca, ahşap yüzeylerden kopabilecek kıymık benzeri parçalar fiziksel bulaşmaya yol açabileceğinden gıda güvenliği açısından ilave risk oluşturabilmektedir. Bu çerçevede, gıdanın üretildiği, işlendiği, muhafaza edildiği, ambalajlandığı alanlarda ahşap malzemelerin kullanımı dikkatle değerlendirilmelidir.

İhracatta kullanılan ahşap ambalaj malzemeleri ile ilgili olarak taşınması ve yayılmasını engellemek için gerekli esasların belirlendiği “*Ahşap Ambalaj Malzemelerinin Isıl İşleme Tabi Tutulması ve İşaretlenmesine Dair Yönetmelik*” (RG, 2024) yayınlanmıştır. Bu yönetmelik *ihraç ürün beraberinde kullanılan ahşap ambalaj malzemeleri* ile ilgili düzenlemeleri içermektedir. Yönetmeliğin amacı; zararlı organizmaların, ihracatta kullanılan ahşap ambalaj malzemeleri ile taşınması ve yayılmasını engellemek için gerekli esasları belirlemektir. Bu Yönetmelik, ahşaptan imal edilmiş ambalaj malzemeleri ile taşınan zararlı organizmaların yayılmasını önlemeye yönelik olarak; ihracatta kullanılacak palet, sandık, kasa, kutu, istif tahtası, kablo makarası ve bobin makarası gibi ahşap ambalaj malzemelerine ısıtma işlemi uygulaması ve karekod, ISPM 15 işaretlemesi ile izlenebilirlik işareti yapılmasına ilişkin esasları, izin belgesi verilmesini, izin belgeli işletmeler, izin belgesiz işletmeler, tedarikçiler, kullanıcılar ve işaretleme aparatı satış izin belgesine sahip işletmelerin denetim ve sorumlulukları ile ahşap ambalaj malzemelerinin denetimine dair hususları kapsamaktadır (GKGM, 2024).

2.2. Plastik Esaslı Madde ve Malzemelerin Mevzuattaki Yeri

Plastik ambalajlar; karbon elementinin hidrojen, oksijen, azot ve diğer organik bileşikler ile oluşturduğu monomer yapının basit yapılı molekül gruplarındaki bağının koparılarak uzun zincirli bir yapı olan polimer yapıya dönüştürülmesiyle elde edilen malzemelerdir. Plastik malzemeler; dayanıklılığı, diğer ambalaj materyallerine kıyasla maliyetinin düşük olması, çeşitli şekillere girebilmesi, hafif olması, depolama kolaylığı sağlaması, gaz ve nem geçirgenliğinin düşük

olması nedeniyle son zamanlarda gıda muhafazada en çok tercih edilen ambalaj materyalleri arasında gösterilmektedir (Yarış & Sezgin, 2017).

Ülkemizde piyasaya arz edilen gıda ile temas eden plastik madde ve malzemelere ilişkin düzenleme olan Türk Gıda Kodeksi Gıda ile Temas Eden Plastik Madde ve Malzemeler Tebliğinde değişiklik yapılarak 06 Mayıs 2024 tarihli Resmî Gazete'de TKG Gıda ile Temas Eden Plastik Madde ve Malzemeler Tebliği (Tebliğ No: 2019/44)'nde Değişiklik Yapılmasına Dair Tebliği (Tebliğ No: 2023/33) (TKG, 2023a) (Tablo 6) yayımlanmıştır. Tebliği ile plastiklerin migrasyon testi koşullarıyla ilgili yeni düzenlemeler yapılmıştır. Yönetmeliğe göre çeşitli gıdalarda kalay için maksimum limit 50-200 mg/kg, arsenik için 0.01-0.3 mg/kg, civa için maksimum limit 0.1-1.0 mg/kg, kadmiyum için 0.01-3 mg/kg ve kurşun için 0.05-1.5 mg/kg olarak belirlenmiştir.

Tablo 6. Plastik esaslı madde ve malzemelerin gıda ile temasa uygunluk kriterleri (TKG, 2019; TKG, 2023a)

Analiz adı	Analiz kapsamı
Spesifik migrasyon	Bisphenol A ([2,2-bis(4- hydroxyphenyl) propan, Ağır Metal Tayini (Kurşun, Kadmiyum, Civa, Arsenik, Alüminyum, Bakır, Baryum, Çinko, Demir, Kobalt, Lityum, Mangan, Nikel)
Toplam Migrasyon (Bitkisel Yağ Simulanti) (D2 Gıda Benzeri (Bitkisel Yağ) ile Toplam Migrasyon)	Numune kullanım şekline bağlı olarak değişen sıcaklık ve süre
Toplam Migrasyon (Bitkisel Yağ Simulanti) Analiz (Toplam Migrasyon (D2	
Spesifik Migrasyon-Fitalat Analizi (Migrasyon) Tek kullanımlık ürünler	
Spesifik Migrasyon-Fitalat Analizi (Migrasyon) Tekrarlı Kullanım Ürünler	
Gıda ile temas eden madde ve malzemelerde kullanılacak plastik malzemelerdeki boyar maddelerin 0,1 M HCl'de çözünen metal/metaloid madde miktarları	Kurşun, arsenik, kadmiyum, selenyum, baryum: max %0.01, krom (max %0.1), antimon (%0.05), civa (%0.005)
1 M HCl'de çözünen ve anilin cinsinden hesaplanan boyar maddedeki sülfonlanmamış primer aromatik amin miktarı 500 mg/kg'ı aşamaz.	
Benzidin, betanaftilamin ve 4-aminobifenilin her biri ya da bunların toplamı 10 mg/kg'ı geçemez.	
Anilin sülfonik asit cinsinden hesaplanan boyar maddedeki toplam sülfonlanmış aromatik amin miktarı 500 mg/kg'ı geçemez.	
Karbon siyahının toluen ekstraktı en çok % 0.15 olmalıdır.	

Dekaklorobifenil cinsinden hesaplanan ekstrakte edilebilen fenillerin miktarı 25 mg/kg'ı geçemez.

Plastik esaslı madde ve malzemelerden oluşan ambalaj materyalinden gıda maddesine doğru gerçekleşen bir kütle transferi olarak “*Migrasyon*” ve tüm bu geçen maddeler “*Migrant*” gıdanın güvenilirliği ve kalitesinde kayıplara, organoleptik özelliklerinde belirgin değişikliklere ve toksisite yaşanma durumlarına sebep olabilmektedir. Migrasyon düzeyi, plastiğin ve gıdanın cinsine bağlı olarak değişebilmektedir. Phthalate esters ve birkaç monomer (styrene gibi), plastik yapımında kullanılırlar ve bunlar paketlerden gıdaya geçebilirler. Bu bileşiklerin çoğunun laboratuvar hayvanlarında kanserojen ve mutajen etkileri gözlenmiştir. Plastik bileşenlerin ya da katkılarının gıdalarda bulunması, eğer doğru bir biçimde kontrolü sağlanmazsa gıdanın organoleptik özelliklerini etkileyebilir ve seviyeleri yasal ve toksikolojik limit değerlerini aşarsa endokrin bozucu etki oluşturabilirler (Altuntaş, 2014).

Plastik gıda ambalajlarında migrasyonu etkileyen faktörler arasında gıdanın yapısı, ambalaj malzemesinin teması, temas eden yüzey alanı ve ambalaj malzemesinin kimyasal özellikleri bulunur. Yüksek molekül ağırlıklı maddelerin varlığı ve düşük geçirgenlik migrasyonu azaltırken, temas süresi ve sıcaklık gibi faktörler migrasyonu artırabilir. Ambalajın doğrudan gıda ile teması ve koruyucu katmanların olmaması da riski yükseltir (Guazzotti, vd., 2022).

Son yıllarda düşük kaliteli biberon, oyuncak gibi plastiklerde Bisphenol-A (BPA) belirlenmesi bebek ve çocuklarda büyük tehlikeye işaret etmektedir. BPA su şişeleri ve plastik damacanalarda da bulunmaktadır (Sedlacekova, 2017). AB, bebek biberonlarının kullanımında yaygın olarak kullanılan yüksek sıcaklıklarda yapılan sterilizasyonun BPA migrasyonunu arttırabileceğini dikkate alarak, sâdece bebek biberonlarında BPA'nın yasaklanmasına karar vermiştir (GMO, 2012).

2.3. Metal Esaslı Madde ve Malzemelerin Mevzuattaki Yeri ve Kullanımında Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar

Gıda ambalajında geleneksel olarak kullanılan malzemeler arasında metaller (alüminyum, folyolar ve laminatlar, teneke levha ve kalaysız çelik) başta gelir. Günümüzde gelişmiş teknolojinin sağladığı imkânlar doğrultusunda metal materyallere istenilen şeklin verilebilmesi, farklı dış yüzey tasarımlarına sahip olmaları, dayanıklı olmaları ve dış etkenlere karşı korunaklı olmaları metal ambalajların tercih edilme sebepleri arasında sayılmaktadır (Özek, 2016). Metal ambalajlar bir çok gıdada çok sık olarak kullanılmaktadır. Bugün konserve, reçel, hayvan mamaları, tatlılar, çaylar, kahveler, meşrubatlar ve spreyler gibi birçok ürünün saklanması metal ambalajlar kullanılmaktadır. Özellikle uzun süre muhafaza gerektiren yiyecek ve içecek konserveleri hazırlanmasında metal

ambalaj kullanımının son 10 yılda yaklaşık iki katına kadar çıktığı görülmektedir. Metal materyal, ambalaj ana malzemesi olmasının yanı sıra diğer birçok ambalaj materyaline uygun şekilde kapak üretiminde de kullanılmaktadır (Arıkan, 2011).

Metal ambalajlar gıdanın temas ettiği raf sistemleri, ürün paketlenme ve gıda ambalajlama dâhil olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Gıda ambalajlamada çelik, alüminyum, kalay ve krom olmak üzere dört çeşit materyal kullanılmaktadır. Gıdaların ambalajlanacağı kutuların hazırlanmasında genellikle çelik ve alüminyum materyalden üretim yapılırken, kalay ve krom materyal bu ürünlerin kaplanması koruyucu tabakalar olarak görev almaktadır (Marsch & Bugusu, 2007; Shin & Selke, 2014).

Metal ambalajlarda hijyen ve korozyon riskleri gıda güvenilirliği ve halk sağlığı sorunlarına yol açabilir. Korozyon (ambalaj iç yüzeyinden metal çözünmesi ve içeriğe geçmesi), metal ambalajların aşınmasına neden olarak ürünlerin kontaminasyonuna ve ağır metallerin gıdalara karışmasına yol açabilir (Erdal, 2024). Farklı pişirme ekipmanlarında pişirilen nohut örneklerinde ağır metal migrasyonunu üzerine yapılan bir araştırma sonucuna göre; alüminyum ve demir ekipmanlarda Al ve Fe migrasyonu limitlerin oldukça üzerinde olurken, çelik ekipmanlarda nispeten daha güvenli olmakla birlikte nikel ve krom geçişine neden olabildiği, teflon gibi kaplamaların çizilme durumunda toksik metalleri gıdaya aktarabileceğini, bunun yanında pişirme işlemi sonrasında bekletilirken, asitli gıdaların uzun süre bekletmenin ve aşınmış ekipmanların kullanımının metal geçişinin arttığını bildirmiştir (Teyin & Nizamlioğlu, 2020). Pişirme ekipmanlarından gıdalara geçebilecek ağır metal düzeyi zaman içerisinde kullanım şekline de bağlı olarak artmakta ve insan sağlığını tehdit edecek seviyelere ulaşabilmektedir. Gıdanın ısıtılma işlemde kullanıldığı farklı malzemelerdeki kaplarda (paslanmaz çelik, emaye dökme demir ve alüminyum) korozyon analizinin yapıldığı bir çalışmada (Gomez, J.M., Gueron, G. & Narvaez, R.A., 2016), alüminyum tencere üretiminde gıdaya uygun alüminyum alaşımı yerine geri dönüşümlü alüminyum malzemesi kullanmaları sonucu iç ve dış kısmında daha yüksek korozyon gösterdiğini, çelik ve döküm tencerelerin güvenilir olduğu tespit edilmiştir.

Ağır metaller (kurşun, kadmiyum, krom, demir, kobalt, bakır, nikel, civa ve çinko olmak üzere 60' dan fazla metal); hammadde aşamasında primer olarak bulaşabildiği gibi üretim, ambalajlama, depolama, gıda ile temas eden madde ve malzemelere uygun olmayan ekipman kullanıldığında sızıntı (migrasyon) yoluyla gıdalara bulaşabilmektedir. Ağır metaller biyolojik olarak parçalanmadığı ve insan vücudunda birikme potansiyeli taşıması nedeni ile sağlık riski oluşturmaktadır. Ağır metallerin zehirli etkileri her metalin özelliğine göre değişmektedir. Ağır metallere maruz kalan bireylerde, çeşitli organ ve sistemler üzerinde ciddi olumsuz etkilerin ortaya çıktığı bildirilmektedir. Sinir sistemi, kemik ve kas dokusu başta olmak üzere birçok doku ağır metal toksisitesinden

etkilenmekte; ayrıca bu metaller, bazı kritik enzim gruplarının fonksiyonlarını bloke ederek kanser gelişimine katkıda bulunabilmektedir. Bunun yanı sıra, ruhsal ve nörolojik etkiler sonucunda davranış bozuklukları görülebilmekte, nörotransmitterlerin üretimi ve işleyişinde düzensizlikler meydana gelebilmektedir (Özbolat & Tüli, 2016; Yücel, vd., 2022).

Ağır metal kirliliklerinin zararlı etkilerini önlemek amacıyla TKG Bulaşanlar Yönetmeliği'nde (TKG, 2023b) belirlenen kurşun, kadmiyum, civa, arsenik, kalay maksimum limit değerlere uygun olmalıdır. Gıda güvenliği için üretilen tüm gıda maddeleri bu limit değerleri aşmamalı ve gerekli denetlemeler ile takip edilmelidir. TKG Gıda ile Temas Eden Madde ve Malzemelere Dair Yönetmelik'in (TKG, 2018; TKG, 2019) Ek.4'ünde Gıda ile temas eden madde ve malzemelere ilişkin kriterler belirlenmiştir. Buna göre;

a) Gıda ile temas eden paslanmaz çelik dışındaki **metal esaslı malzemeler** gıdanın özelliğine göre kalay, krom, krom oksit, emaye, seramik esaslı malzemeler, lak, plastik veya gıda ile temasa uygun bir kaplama ile kaplanmalıdır (b ve c bentlerinde yer alan hükümler saklı kalmak kaydıyla).

b) Gıda ile temas için üretilmiş, kaplamasız dökme demir malzemeler, etiketlerinde yönetmeliğin 13 üncü maddenin birinci fıkrasının (a) bendinin (2) numaralı alt bendi gereğince uygun kullanım için koşulların belirtilmesi ve bu Yönetmeliğin genel hükümlerine uygun olması şartıyla kullanılabilir.

c) Gıda ile temas eden alüminyum ve alüminyum alaşımlar için (g) ve (ğ) bendinde yer alan hükümler dikkate alınmalıdır.

ç) Kaplama maddelerinin kaplanan tüm yüzeylere homojen bir şekilde dağılması gerekir.

d) Lak ve plastik kaplamalar gıda ile temas eden plastik maddelerin özelliklerine, seramik kaplamalar ise gıda ile temas eden seramik malzemelerin özelliklerine uygun olmalıdır.

e) *Metal esaslı malzemelerin gıda ile temas eden yüzey kaplamasındaki kalay miktarı en az 2.3 g/m², krom miktarı en az 50 mg/m² ve krom oksit miktarı en az 7 mg/m² olmalıdır.*

f) Metalik kaplama maddelerinin bileşiminde; antimon % 0.05'ten, kadmiyum % 0.001'den, arsenik % 0.03'ten, kurşun % 0.05'ten fazla olamaz.

g) Gıda ile temas eden alüminyum ve alüminyum alaşımı madde ve malzemelerden gıdaya geçen alüminyum miktarı en fazla 5 mg/kg gıda olacaktır. Gıda ile temas eden kaplamasız alüminyum ve alüminyum alaşım madde ve malzemelerin etiketlerinde 13 üncü maddenin birinci fıkrasının (a) bendinin (2) numaralı alt bendi gereğince; 'asidik (pH < 4.5), bazik (pH > 8.5) ve tuz içeriği %3.5 NaCl'den fazla olan gıdaların depolanması, pişirilmesi ya da işlenmesi için

kullanmayınız’ veya ‘sadece buzdolabı koşullarında muhafaza için kullanınız’ ifadelerine yer verilir.

ğ) **(Değişik:RG-8/2/2019-30680)** Alüminyum folyolarda, alüminyum tüplerde ve tek kullanımlık alüminyum kaplarda alüminyum miktarı en az %99 olmalıdır. Alüminyum alaşımlarından üretilen ürünlerde bu koşul aranmaz.

h) Metal ambalaj kapaklarında kullanılacak contalar, kapak kenarına homojen bir şekilde dağılır, kopma yapmaz ve ısıl işlemlere uygun olur. Plastik contaların özellikleri gıda ile temas eden plastik madde ve malzemelerin özelliklerini sağlar.

ı) Çinko ve çinko ile galvanize edilmiş madde ve malzemeler asitli gıdalar ve alkollü içkiler için kullanılamaz. Ayrıca 13 üncü maddenin birinci fıkrasının (a) bendinin (2) numaralı alt bendi gereğince bu madde ve malzemelerin etiketlerinde ‘asitli gıdalar ve alkollü içkiler için kullanılmaz’ ifadesine yer verilmelidir.

Gıdaların üretiminde kullanılan alet-ekipmanların niteliği, fiziksel, kimyasal ve biyolojik tehlikelere yol açmamalıdır. Bunun için; iyi hijyen uygulamalarına uygun olması, kodekste belirtilen şartları taşıması, özellikle metal esaslı gıda ile temas eden madde ve malzemelerin korozif etki göstermemesi, uygun şekilde kalay veya lak ile kaplanarak koruyucu önlemlerin alınması, ısıl işlem uygulanacak proseslerde alüminyum kullanımından kaçınılması, dolum yapılan kapların cam malzeme veya raf ömrü boyunca metal iyonu geçişine neden olmayan materyalin kullanılması, asitli besin maddelerinin ambalajlarında asitlere karşı dirençli lakların kullanılması, proteinli besin maddelerinin konservesinde kukurde karşı dirençli laklar uygulanması, teflon vb. aşınmış ekipmanların kullanılmaması, gıda ile temas eden ambalajların hijyenik koşullarda saklanmasına dikkat edilmelidir (Tayfur, M., Ünlüoğlu, İ., & Bener, Ö., 2002; Akçay, 2008; RG, 2011; TGK 2018; TGK 2019).

3. SONUÇ

Bu çalışmada, geleneksel ürün adı ve mahreç işareti ile tescillenen ürünlerin üretimlerinde kullanılan ekipmanların gıda ile temasa uygunluğunun değerlendirilmesi amaçlanmıştır. TÜRKPATENT veri tabanından elde edilen bilgilere göre; 28 coğrafi işaret tescilli ürünün yalnızca %35,71’inde, Geleneksel Ürün Adı ile tescillenen 7 ürünün 3’ünde (%25), Mahreç İşareti ile tescillenen 8 pekmez çeşidinin yalnızca 2’sinde (%25) ve 11 turşu çeşidinin yalnızca 3’ünde (%27,27) üretimde kullanılan ekipmanların gıda ile temasa uygunluğuna ilişkin şartların belirtildiği görülmüştür. İki salça ürününün her ikisinde de ekipman niteliğine dair uygunluk koşullarına yer verildiği belirlenmiştir.

Genel olarak, denetim kriterlerinde “üretim metoduna uygunluk” ifadesine yer verilmesine karşın; bakır, ahşap, metal veya diğer üretim materyallerinin teknik özelliklerine, gıda temas uygunluğuna ya da kullanım koşullarına yönelik

ayrıntılı düzenlemelerin bulunmadığı tespit edilmiştir. İncelenen ürünlerde geleneksel üretim proseslerinde bakır kazan, ahşap tekne, plastik kasa ve alüminyum gereçlerin yaygın olarak kullanıldığı; bazı tescil dosyalarında bakır kazanların çift kat kalaylı olmasına ilişkin şartlara yer verilirken, bazılarında bakır ekipmanlara yönelik herhangi bir kullanım koşulu veya temizlik-dezenfeksiyon gerekliliğinin belirtilmediği görülmüştür. Bu bulgular, gıda ile temas eden madde ve malzemelere ilişkin ulusal mevzuata açık bir atfın çoğu tescil belgesinde yer almadığını göstermektedir.

Geleneksel yöntemlerle üretilen ve tescile konu olan gıdaların üretiminde kullanılan alet ve ekipmanların gıda ile temasa uygunluğu, üretim metotlarında gıda güvenliğini etkileyen önemli bir parametredir. Geleneksel ürünlerin kültürel değerlerinin korunması önemli olmakla birlikte, üretim koşullarının genel ve özel hijyen gerekliliklerine uygun olması zorunludur. Kullanılan ekipmanların temizlik ve dezenfeksiyona elverişli olması, korozyon etkisi göstermemesi, fiziksel, kimyasal ve biyolojik tehlikelere yol açabilecek bulaşma riski oluşturmaması ve yasal mevzuatla uyumlu üretim süreçlerinin sağlanması gerekmektedir.

Gıdaların hammadde kabulünden itibaren temas ettiği yüzeylerin, üretim, işleme ve dağıtımın tüm aşamalarında kullanılan ahşap, metal ve plastik esaslı madde ve malzemeler, insan sağlığı için risk oluşturmamalıdır. Gıda ile direkt veya dolaylı yoldan temas eden materyallerden kaynaklanabilecek bulaşmalar (*örneğin özellikle bakır ve alüminyum gereçlerde asidik ve yüksek sıcaklıklarda metal esaslı ekipmanlarda oluşabilecek ağır metal migrasyonu*), yasal mevzuatlarda belirlenen maksimum limitleri geçmemeli, bulaşmaların risk kaynağı belirlenmeli, önlenmeli, azaltılmalı veya ortadan kaldırılması için gerekli tedbirler alınmalıdır.

Referanslar

- Akçay, F.P. (2008). Lak ve kalay miktarı farklı teneke ambalajlarda piyasaya sunulan Gemlik tipi sofralık siyah zeytinlerde bazı metal iyonlarının geçişme düzeylerinin tespiti. *Gıda ve Yem Bilimi Teknolojisi*, 10, 14-21.
- Arıcan, Y.E. (2021). Gıdaların ağır metallerle kontaminasyonu. Çocuk Kronik Hastalıklarında Beslenme-4-pp. 577-597. Orient Yayınları, ISN: 978-975-6124-85-7
- Aşıkkutlu, S. (2012). Ahşap Esaslı Ürünler ve Ambalaj Olarak Kullanımları. <https://www.sabittuncel.com/ahsabin-ambalajda-kullanimi/>
- Aviat, F., Gerhards, C., Rodriguez-Jerez, J.J., Michel, V., Le Bayon, I., Ismail, R. & Federighi, M. (2016). Microbial Safety of Wood in Contact with Food: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 15(3), 491-505.
- Carpentier, B. (1997). Sanitary quality of meat chopping board surfaces: a bibliographical study. *Food Microbiology*, 14 (1), 31-37.
- Çekal, N. & Doğan, M. (2021). Geleneksel mutfak gereçlerinde metal migrasyonu üzerine bir değerlendirme. *Gıda Teknolojileri Dergisi*, 45(2), 155-167.
- Pilip, S., Fink, R., Oder, M. & Jevs̃nik, M. (2012). Hygienic acceptance of wood in food industry. *Wood Science & Technology*, 46, 657-665. DOI 10.1007/s00226-011-0440-0
- EAA. (2018). European Aluminium Association. *Anodized aluminium for food contact applications*.
- EFSA. (2019a). European Food Safety Authority. *Scientific opinion on the safety of materials intended to come into contact with food*. EFSA Journal, 17(6), 5730.
- EFSA. (2019b). European Food Safety Authority. Metals in food: scientific opinion on safety. EFSA Journal.
- EFSA. (2019c). European Food Safety Authority. Scientific opinion on the safety of materials intended to come into contact with food. EFSA Journal, 17(6), 5730
- EFSA. (2020). Re-evaluation of aluminium compounds as food contact materials. EFSA Journal, 18(3), 6013.
- Erdal, G. (2024). Gıda sektöründe metal ambalaj. *Uluslararası İnsan ve Sanat Araştırmaları Dergisi*, 9 (1), 56-64.
- Elveren, A. & Osman, M. (2021). Metalik mutfak gereçlerinin potansiyel kirlenici etkileri. *Gıda ve Sağlık Dergisi*, 8(2), 45-53.

- Ercan, H. & Soysal, Y. (2020). Food contact metals and migration behavior in cookware. *Journal of Food Safety*, 40(3), 1-10.
- GKGM. (2024). Tarım ve Orman Bakanlığı Gıda ve Kontrol Genel Müdürlüğü. <https://www.tarimorman.gov.tr/GKGM/Haber/913/Ahsap-Ambalaj-Malzemelerinin-Isil-Isleme-Tabi-Tutulmasi-Ve-Isaretlenmesine-Dair-Yonetmelik-Yayimlandi>
- Gomez, J.M., Guerron, G. & Narvaez, R.A. (2016). Corrosion analysis in different cookware materials. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 34 (8), 389-393.
- Karaosmanoglu, D. (2010). Nostalgia spaces of consumption and heterotopia: Ramadan Festivities in Istanbul. *Culture Unbound*, 2(2), 283-302.
- Koontz J.L., Liggans G.V. & Redan B.W. (2020). Temperature and pH affect copper release kinetics from copper metal foil and commercial copperware to food simulants. *Food Additives and Contaminants: Part A*, 37 (3), 465-477.
- Krewski, D., Yokel, R.A., Nieber, E., Borchelt, D., Cohen, J., Harry, J., Kacew, S., Lindsay, J., Mahfouz, A.M. & Roundeau, U. (2007). Human health risk assessment for aluminium, aluminium oxide and aluminium hydroxide. *Journal of Toxicology and Environmental Health B Critical Reviews*, 10(1), 1-269.
- Marsh, K. & Bugusu, B. (2007) Food Packaging – Roles, Materials, and Environmental Issues. *Journal of Food Science*, 72(3): 39-55.
- Milling, A., Smalla, K., Kehr, R., and Wulf, A., 2005. The use of wood in practice-a hygienic risk? *Holz als Roh-und Werkstoff*, 63(6), 463-472.
- Özbolat, G. & Tuli, A. (2016). Ağır metal toksisitesinin insan sağlığına etkileri. *Arşiv Kaynak Tarama Dergisi*, 25(4), 502-521. doi:10.17827/aktd.253562.
- Özek, U.E. (2016). Ambalaj Sektörü ve TRB1. https://fka.gov.tr/sharepoint/userfiles/Icerik_Dosya_Ekleri/FKA_ARASTIRMA_RAPORLARI/AMBALAJ%20SEKT%C3%96R%C3%9C%20VE%20TRB1.pdf
- RG. (2011). Gıda Hijyen Yönetmeliği. 17.12.2011 tarih ve 28145 sayılı Resmi Gazete. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=15592&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>
- RG. (2024). Ahşap Ambalaj Malzemelerinin Isıl İşleme Tabi Tutulması ve İşaretlenmesine Dair Yönetmelik. 26.07.2024 tarih ve 32613 sayılı Resmi Gazete. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=40877&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>

- Sezgin, A.C., Öztürk, B. & Kalaycı, D.B. (2019). Yemek Sistemlerinde Kullanılan Ambalaj Malzemeleri. *IV. Uluslararası Gastronomi Turizmi Araştırmaları Kongresi*, 19-21 Ekim Nevşehir, 153-161.
- Shin, J. & Selke, S.E.M. (2014) Food Packaging. Food Processing: Principles and Applications (Second Edition), Clark, S., Jung, S., Lamsel, B. (ed), John Wiley & Sons, 249-273.
- Vasilopoulou, E.V., Dilis, S., Soukara, A. & Trichopoulou, A. (2005). The systematic investigation of traditional foods in Europe. *1st International Food and Nutrition Congress. TUBITAK*, June 15, İstanbul.
- Veríssimo, C., Oliveira, C. & Gomes, A. (2005). Traditional cookware materials and food safety considerations. *Food Chemistry*, 92(1), 245-250.
- Yarış, A & Sezgin, C.A., 2017. Food Packaging: Glass and Plastic, Araplıoğlu, H., Atık, A., Elliot, R.L. & Turgeon, E. (Ed.), Researches on Science and Art in 21st Century Turkey (s. 735-740). Ankara: Gece Publishing.
- Yorulmaz, M. & Tuncel, N. (2020). Migration of aluminium from cookware into acidic foods. *Journal of Food Quality and Safety*, 5(2), 89-97.
- Tayfur, M., Ünlüoğlu, İ., & Bener, Ö. (2002). Aluminum and health. *The Journal of Food*, 27(4), 305-309.
- Teyin, G. & Nizamlıoğlu, H.F. (2021). Pişirme ekipmanı kaynaklı ağır metallerin tespit edilmesi; Nohut örneği. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9 (3), 666-675. DOI: 10.36306/konjes.895459
- TGK. (2011). Türk Gıda Kodeksi Gıda ile Temas Eden Madde ve Malzemeler Yönetmeliği. 29.12. 2011 tarih ve 28157 (3. Mükerrer) sayılı Resmi Gazete.
- TGK. (2018). Gıda ile temas eden madde ve malzemelere dair yönetmelik. 05.04.2018 tarih ve 30382 sayılı Resmi Gazete. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/04/20180405-2.htm>
- TGK. (2019). TGK Gıda ile Temas Eden Plastik Madde ve Malzemelerin Bileşenlerinin Migrasyon Testinde Kullanılan Gıda Benzerleri Listesi Tebliği (Tebliğ No: 2019/44). 25.12.2019 tarih ve 30989 (Mükerrer) sayılı Resmi Gazete.
- TGK. (2021). Türk Gıda Kodeksi Gıda Etiketleme ve Tüketicileri Bilgilendirme Yönetmeliği Kılavuzu. <https://kms.kayis.gov.tr> /Home/Goster/160822?AspxAutoDetectCookieSupport=1
- TGK. (2023a). Gıda ile Temas Eden Plastik Madde ve Malzemeler Tebliği (Tebliğ No: 2019/44)'nde Değişiklik Yapılmasına Dair Tebliğ (Tebliğ No: 2023/33). 06.05.2024 tarih ve 32538 sayılı Resmi Gazete.
- TGK. (2023b). Türk Gıda Kodeksi Bulaşanlar Yönetmeliği. 05.11.2023 tarih ve 32360 sayılı Resmi Gazete.

- TÜRKPATENT. (2025). TÜRKPATENT Coğrafi İşaret Veri Tabanı. <https://ci.turkpatent.gov.tr/veri-tabani>
- WHO. (2021a). World Health Organization. *Toxicological profile of copper and aluminium in dietary exposure*. WHO Technical Report Series, Geneva.
- WHO. (2021b). World Health Organization. *Toxicological profile of metals in dietary exposure*.

BÖLÜM 15

Cevherleşme Süreci Sonucunda Oluşan Bakır Atıklarının Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı

**Muhammed Enes Türk¹ &
Mehmet Hayrullah Akyıldız²**

¹ Arşt Gör., Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü,
0000-0002-1373-165X

² Dr. Öğrt. Üyesi, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü,
0000-0001-7239-3518

GİRİŞ

Kentsel alanlarda arsa kıtlığı ve maliyet baskıları, zayıf zeminler üzerinde inşaat faaliyetlerinin artmasına yol açmaktadır. Doğal zeminin taşıma gücü yetersiz veya sınırda olduğu durumlarda doğrudan yapılaşma önemli riskler doğurur; bu koşullarda zemin iyileştirme teknikleri, mühendislik güvenliği ve ekonomik fizibilitenin sağlanmasında kritik rol oynar. Bu çalışma, katkı malzemeleri ile zemin stabilizasyonu yaklaşımını odağa alarak mermer tozu ve uçucu kül gibi yaygın bağlayıcılara ek olarak bakır cürufunun stabilizasyon amaçlı kullanım potansiyelini incelemektedir.

ZEMİN STABİLİZASYONU

Taşıma gücü yetersiz zeminler üzerinde inşaat faaliyetlerinin gerçekleştirilmesi ciddi riskler barındırır. Bu nedenle, planlanan yapı türüne uygun taşıma gücü analizleri yapıldıktan sonra, düşük taşıma kapasitesine sahip zeminlerin uygun yöntemlerle iyileştirilmesi zorunludur. Bu kapsamda, zemin iyileştirme teknikleri içinde yer alan zemin stabilizasyonu uygulamaları, özellikle son yıllarda artan ihtiyaç ve güvenlik gereksinimleri doğrultusunda önemli bir gereklilik haline gelmiştir.

Literatürde yaygın olarak uygulanan zemin stabilizasyon yöntemleri arasında; zayıf zeminlerin kimyasal yollarla iyileştirilmesi ile geleneksel bağlayıcılar olan Portland çimentosu ve kireç kullanılarak gerçekleştirilen stabilizasyon işlemleri başat yaklaşımlar olarak öne çıkmaktadır.[1]

Zemin stabilizasyonunda en yaygın kullanılan bağlayıcı, geleneksel Portland çimentosudur. Yeterli mekanik performansı, hammaddeye erişimin görece kolaylığı ve maliyet avantajları bu yaygınlığı desteklemektedir. Bununla birlikte, çimento üretiminin yüksek CO₂ salımı, hammadde temin süreçlerinde doğal kaynakların tüketimi ve çimentoya özgü çeşitli durabilite sorunları, daha çevresel açıdan sürdürülebilir alternatif malzemelerin tercih edilmesini gerekli kılmaktadır [2,3].

Zemin stabilizasyonunun farklı amaçlarla uygulanması, bir dizi teknik ve yapısal üstünlük sağlamaktadır. Başlıca avantajlar aşağıda özetlenmiştir:

Zeminin taşıma gücünün artırılması,

Oturma potansiyelinin azaltılması ve buna bağlı olası yapısal hasarların en aza indirilmesi,

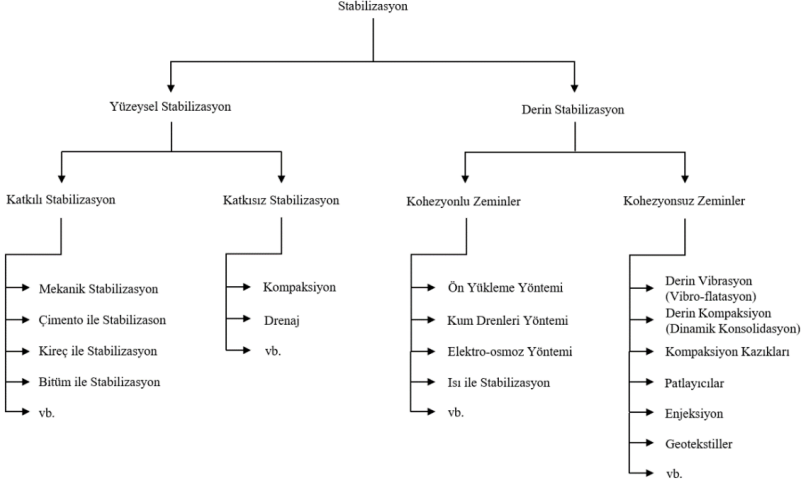
Su geçirgenliğinin ve boşluk suyu basıncının düşürülmesi,

Yeraltı suyunun drenajının daha etkin ve kolay biçimde gerçekleştirilmesi,

Zeminlerin şişme ve büzülme kaynaklı risklerinin azaltılması,

Dolgu yapıları, eğimli araziler ve toprak barajlar gibi mühendislik uygulamalarında stabilitenin artırılması. [4]

Uzuner, (2016) tarafından yapılan bir çalışmada uygulanacak stabilizasyon işlemleri ile ilgili birçok yöntemin varlığından bahsedilmiştir. Bu çalışmada da görüleceği gibi, zemin stabilizasyon tekniklerinin tercih edilmesi işleminde uygulanacak zeminin türü ve yapılacak stabilizasyon işleminin amacı net bir şekilde belirlenmelidir. Zayıf zeminler üzerinde yapılan çeşitli stabilizasyon teknikleri Şekil 1.de verilmiştir. [5]



Şekil 1. Çeşitli Zemin Stabilizasyon Uygulamaları, (Uzuner, 2016; Sarıcı, 2019)[5,6]

Günümüzde teknolojik ilerleme ivme kazanmış olup, buna paralel biçimde metal talebinde belirgin bir artış gözlenmektedir. Ancak artan talebe karşın, mevcut doğal kaynaklardaki metal tenörlerinin azalması, birincil cevherlerden üretimi giderek daha güç ve maliyetli hale getirmektedir. Bu koşullar, daha düşük tenörlü hammaddelerden ekonomik olarak anlamlı metal geri kazanımını mümkün kılacak yenilikçi süreç ve teknolojilerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Öte yandan, metal üretim hatlarında ortaya çıkan proses kayıpları nedeniyle oluşan artık ve yan ürünler, çoğu durumda önemli miktarda metal ve metal oksit fazlarını bünyelerinde barındırmakta; aynı zamanda uygunsuz bertaraf edilmediklerinde çevresel riskler yaratabilmektedir. Bu çift yönlü gerçeklik, “ikincil metalurjik hammadde” kavramını öne çıkarmakta ve söz konusu malzemelerin bütüncül bir kaynak yönetimi perspektifiyle değerlendirilmesini gündeme getirmektedir. Her ne kadar bu ikincil hammaddelerin toplam üretim içindeki payı sınırlı olsa da, içeriklerindeki ekonomik değeri yüksek metal fazları, artan küresel talebin belirli bir bölümünün sürdürülebilir biçimde karşılanmasına katkı sağlayabilir. Dolayısıyla, ikincil kaynakların sistematik biçimde toplanması, karakterizasyonu, uygun zenginleştirme ve geri kazanım proseslerine tabi tutulması; hem kaynak verimliliğinin artırılması hem de çevresel olumsuzlukların azaltılması açısından stratejik önem taşımaktadır [7].

Metalurjik katı atıklar içinde en önemli grubu, çeşitli silikat fazlarını içeren karmaşık bileşimli cüruflar oluşturur. Bakır rafinasyonu süreçlerinde öne çıkan ara ürün, özellikle ateşte rafinasyon aşamasında oluşan cüruf olup, süreç koşulları ve kullanım potansiyeline bağlı olarak atık ya da yan ürün olarak sınıflandırılır [8].

Vural (2024) tarafından yapılan çalışmada, deprem yıkıntı atıklarının zemin iyileştirme süreçlerinde kullanımı ele alınmıştır. 1999 yılında meydana gelen Sakarya depremleri sonucunda oluşan yıkıntı atıkları ile laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneylerde, bu atıkların California Bearing Ratio (CBR) değerleri belirlenmiştir. Araştırmada, şişme potansiyeli yüksek olan kaolen kili, zemin iyileştirme testlerinde örnek malzeme olarak seçilmiş ve farklı oranlarda kireç ile inşaat yıkıntı atığı karışımları kullanılarak deneyler yapılmıştır.

Deney sonuçları, %3 yıkıntı atığı, %5 kireç ve %92 kaolin karışımının en düşük CBR değerlerini sunduğunu; buna karşılık %23 yıkıntı atığı, %5 kireç ve %72 kaolin karışımının en yüksek CBR değerlerini sağladığını göstermektedir. Bulgular ışığında, deprem yıkıntı atıklarının zemin iyileştirme alanındaki potansiyelinin değerlendirilmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. [9]

Ural vd. (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, %10 oranında çimentonun eklenmesiyle elde edilen çimentolu killi zemin karışımına %5, %10 ve %15 oranında atık PVC fiberleri ilave edilerek 0 ve 28 günlük numunelerin hazırlanmasını içermektedir. Laboratuvar koşullarında üretilen bu numuneler, tek eksenli basınç testine tabi tutulmuş ve atık PVC fiberinin çimentolu killi zemin üzerindeki serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Sonuçlar, belirli oranlarda atık PVC fiberinin killi zeminlerin iyileştirilmesinde etkili bir alternatif olarak kullanılabileceğini ifade etmişlerdir. [10]

Zorluer ve Usta (2003), mermer fabrikalarında oluşan atık mermer tozunun zemin iyileştirmede katkı malzemesi olarak değerlendirilebilirliğini incelemiştir. Çalışmada zemin numunesi olarak Meşelik kili kullanılmış; söz konusu kil, kum ağırlığı temel alınarak farklı oranlarda atık mermer tozu ile karıştırılmış ve standart proctor sıkıştırma enerjisiyle hazırlanmıştır. Numunelerin şişme davranışı odometre deneyleriyle belirlenmiş; elde edilen bulgular, atık mermer tozunun kil zeminlerin şişme potansiyelini anlamlı düzeyde etkileyebildiğini göstermiştir. Araştırmacılar, bu sonuçlar doğrultusunda atık mermer tozunun zemin iyileştirmesinde uygulanabilir bir katkı malzemesi olduğunu ifade etmişlerdir [11].

Umu ve vd., atık lastik tozunun ISO standart kumunun dinamik davranışına etkisini değerlendirmek üzere burulmalı rezonans kolon deneyleri gerçekleştirmiştir; önce saf kum üzerinde modül azalımı (G/G_{max}), sönüm oranı ve maksimum kayma modülü (G_{max}) eğrilerini belirlemiş, ardından kuma ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında lastik tozu ilavesiyle aynı ölçümleri

tekrarlayarak sonuçları karşılaştırmıştır. Bulgular, özellikle %5–10 katkı aralığında kayma dayanımı ve sönüm oranında anlamlı artışlar ile Gmax açısından en iyi performansın elde edildiğini ortaya koymuş; bu durum, lastik tozunun yüksek sönümleme kapasitesi sayesinde kumun dinamik yanıtını iyileştirdiğini ve geoteknik mühendisliğinde etkili bir katkı malzemesi olarak değerlendirilebileceğini göstermiştir. [12]

Freitag, ince daneli zeminlere hacimce %1 oranında ve 20 mm uzunlukta polyester lif ilave ederek hazırladığı numunelerde önce kompaksiyon deneyiyle optimum su muhtevasını belirlemiş, ardından serbest basınç (serbest basma) deneylerini uygulamıştır; sonuçlar, lif katkılı numunelerin lif içermeyenlere göre yenilme dayanımında yüzde 25'e varan artış sağladığını göstermiştir. Araştırmacı ayrıca kullandığı naylon ve polipropilen liflerin benzer performans ortaya koyduğunu not etmiş ve liflerin 0.20 mm'den ince daneli zeminlerde homojen olarak dağıtılmasının önemli ölçüde güçlük taşıdığını vurgulamıştır. [13]

Naeini ve Sadjadi, doygun olmayan kil zeminlerin kayma direnci üzerinde atık polimer katkısının etkisini değerlendirmek üzere, plastisiteleri farklı üç kil türüne %0, %1, %2, %3 ve %4 oranlarında polimer ilavesi yaparak numuneler hazırlamış ve kesme kutusu deneyleri gerçekleştirmiştir; elde edilen veriler, özellikle %2 katkı düzeyinde kohezyon ile içsel sürtünme açısının katkısız örneklerle kıyasla anlamlı ölçüde arttığını, tüm zeminlerde maksimum kayma gerilmesinin %2 polimer içeriğiyle elde edildiğini göstermiştir; ayrıca en yüksek kayma gerilmesi artışı düşük plastisiteli kilde yaklaşık %25 olarak saptanmış, bu bulgular atık polimerlerin killi zeminlerin mukavemet parametrelerini iyileştirmede etkili bir stabilizasyon yaklaşımı sunduğunu ortaya koymuştur. [14]

Metal atıklarının değerlendirilmesi, döngüsel ekonomi ilkeleriyle uyumlu bir metal tedarik zinciri kurgulamak ve birincil cevherlere olan bağımlılığı azaltmak açısından kritik bir adımdır. Bu kapsamda, metal atıklarının teknolojik, ekonomik ve çevresel boyutları birlikte ele alınarak, uygun proses optimizasyonu ve düzenleyici çerçeve desteğiyle endüstriyel ölçekte uygulanabilir geri kazanım modellerinin hayata geçirilmesi gerekmektedir. Geri kazanım yaklaşımı kapsamında, zemin iyileştirme uygulamalarında stabilizasyon malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmaktadır.

MATERYAL

Bakır Madeni

İnsanlık tarihi boyunca bakır; süs eşyaları, silahlar, el sanatları ve mutfak gereçlerinin üretiminde geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Uygarlıkların ilerlemesiyle birlikte bu metale yönelik talep belirgin biçimde artmıştır. Günümüzde toplam tüketimi 13×10^6 ton seviyesini aşan bakır, kullanım sıklığı bakımından ikinci sıradaki metal konumundadır. Kişi başına düşen yıllık tüketim

miktarı gelişmiş ülkelerde yaklaşık 10 kg iken, az gelişmiş ülkelerde bu değer 1–2 kg aralığında seyretmektedir [15].

Yer kabuğunda ortalama 55 ppm (%0,0055) düzeyinde bulunan bakırın doğal konsantrasyonu; nikel, seryum, vanadyum ve stronsiyum gibi görece nadir kabul edilen elementlerden daha düşüktür(Tablo 1., Tablo 2., Tablo 3.). Bununla birlikte, jeolojik süreçler sonucunda ekonomik maden yatakları oluşturma potansiyeli, kendisinden daha yaygın görülen pek çok elemente kıyasla daha yüksektir [8].

Tablo 1. Bakır Elementinin Temel Özellikleri [16]

Özellik	Değer
Atom numarası	29
Element serisi	Geçiş metalleri
Grup, periyot, blok	11, 4, d
Görünüş	Metalik kahverengi
Atom ağırlığı	63,546 g/mol
Elektron dizilimi	[Ar] 3d ¹⁰ 4s ¹

Tablo 2. Bakırın Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri [17]

Özellik	Değer
Simgesi	Cu
Sertliği	2.5–3
Yoğunluğu	8.93 g/cm ³
Ergime noktası	1083 °C
Kaynama noktası	2300 °C

Özellik	Değer
Ergime ısısı	43 k.cal (1 kg'ın ergimesi için gerekli ısı)
Elektrik iletme özelliği	%99.95

Tablo 3. Bakırın Kullanım Alanları [17]

Kullanım Alanı	Toplam Kullanımdaki Payı
Elektrik ve elektronik sanayii	%50
İnşaat sanayii	%17
Ulaşım sanayii	%11
Endüstriyel ekipmanlar	%14
Askeri ve diğer sanayi kolları	%8

Günümüzde ekonomik gelişmelere bağlı olarak yaşam standartlarının sürekli yükselmesiyle bakıra yönelik talebin istikrarlı biçimde artacağı öngörülmüşken, kimi kullanım alanlarında ikame malzemeleri bulunsa dahi bakırın güncelliğini ve sektörel ağırlığını muhafaza edeceği anlaşılmaktadır. Nitekim insanlar tarafından eski çağlardan beri çeşitli amaçlarla değerlendirilen bakır, modern endüstride de temel girdiler arasında yer almakta ve bu konumunu, yüksek elektrik ve ısı iletkenliği, aşınmaya karşı dayanımı, sünekliği ve dövülebilirliği ile antikorozyon özellikleri gibi çok yönlü niteliklerinin yanı sıra geniş alayım çeşitliliğinin farklı mühendislik gereksinimlerine esnek çözümler sunması sayesinde sürdürmektedir. [17]

SONUÇ

Sürdürülebilir mühendislik yaklaşımlarının yaygınlaştırılması, çevresel kirliliğin azaltılması ve doğal kaynakların verimli kullanımı açısından stratejik önem taşır. Bu bağlamda, zenginleştirme süreçlerinden kaynaklanan bakır atıkları ekotoksikolojik riskler içerse de, uygun ön arıtma ve kapsamlı karakterizasyon sonrasında geoteknik uygulamalarda zemin stabilizasyonu için ikincil hammadde olarak değerlendirilebilir. Mineralojik bileşim, tane boyu dağılımı, spesifik yüzey alanı, pH–Eh davranışı ve ağır metal sızıntı potansiyelinin (ör. TCLP, DIN 38414) laboratuvar ortamında belirlenmesi;

ardından kompresyon, CBR/PLT, serbest basınç, üç eksenli kesme ve dayanıklılık (ıslanma–kuruma, donma–çözülme) performansının saha doğrulamasıyla desteklenmesi, bakır atıklarının çimento, kireç veya jeopolimer bağlayıcılarla hazırlanan zemin iyileştirme karışımlarında teknik ve çevresel açıdan uygulanabilirliğini ortaya koyabilir. Literatürde, bakır atıklarıyla benzer köken ve tane özellikleri gösteren çok sayıda endüstriyel yan ürünün (uçucu kül, yüksek fırın cürufu, çelik cürufu, fosfojips, kırmataş tozu, tuğla fırını külü, maden zenginleştirme artıkları) farklı zemin tiplerinde mukavemetin artırılması, şişmenin kontrolü ve geçirgenliğin düşürülmesi amaçlarıyla başarıyla kullanıldığı raporlanmıştır. Bu birikim, bakır zenginleştirme atıklarının da uygun bağlayıcı seçimi, oran optimizasyonu ve sistematik çevresel risk yönetimi ile benzer performans sergileyebileceğine dair güçlü bir ön gösterge sunar. Böyle bir yaklaşım, atık depolama yükünü ve birincil malzeme tüketimini azaltarak döngüsel ekonomi ilkeleriyle uyumlu bir sürdürülebilir mühendislik pratiği sağlar; yerel malzeme erişilebilirliği ve yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) ile desteklendiğinde çevresel ve ekonomik kazanımlar birlikte maksimize edilebilir.

KAYNAKÇA

- [1] Yi, Yaolin, Liyang Gu, and Songyu Liu. "Microstructural and mechanical properties of marine soft clay stabilized by lime-activated ground granulated blastfurnace slag." *Applied Clay Science* 103 (2015): 71-76.
- [2] Ghadir, Pooria, and Navid Ranjbar. "Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement." *Construction and building materials* 188 (2018): 361-371.
- [3] Bushlaibi, A. H., & Alshamsi, A. M. (2002). Efficiency of curing on partially exposed high-strength concrete in hot climate. *Cement and concrete research*, 32(6), 949-953.
- [4] Çalık, Ü. (2012). Perlitin puzolanik katkı olarak kireç ile birlikte zemin stabilizasyonunda kullanımı, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, s.159, Trabzon.
- [5] Uzuner, B., A. (2016). Temel Mühendisliğine Giriş, Derya Kitabevi, 6. Basım, Trabzon, 409s.
- [6] Sarici, T. (2019). Puzolan ile güçlendirilmiş inşaat ve yıkıntı atıklarının granüler dolgu olarak kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi, Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya
- [7] İkiz, D. (2005). "Kalkopirit Cevherinden Bakırın Hipoklorit Çözeltisi ile Çözünme Kinetiği." Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Haziran. S.A.Ü, 2005
- [8] Gülfen, M., "Kalkopirit Cevherindeki Bakırın Sülfürik Asit Çözeltisinde Çözünürlüğünün İncelenmesi", Doktora Tezi, Subat, 2002.
- [9] Vural, İsa. "İnşaat yıkıntı atıklarının zemin iyileştirmesinde kullanılabilirliği." *Academic Platform-Journal of Engineering and Science* 7.1 (2019): 1-6.
- [10] Ural, Nazile, Ümit Kut, and Nurcihan Gülsevinç. "Atık PVC ile zemin iyileştirme." *El-Cezeri* 7.3 (2020): 1471-1481.
- [11] Zorluer, Ismail, Mürsel USTA, And Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Bölümü Akü. "Zeminlerin Atık Mermer Tozu İle İyileştirilmesi." (2003).
- [12] Umu S.U., Okur D.V., Yılmaz G., Fırat S., "Dinamik Yükleme Şartlarında Kum/Lastik Karışımlarının Rijitlik Ve Sönüm Özelliklerinin İncelenmesi", *Politeknik Dergisi*, 2014,17(1):13-21.
- [13] Freitag, Dean R. "Soil randomly reinforced with fibers." *Journal of Geotechnical Engineering* 112.8 (1986): 823-826.
- [14] Naeini, Seyed Abolhassan, Bahman Naderinia, and Ehsan Izadi. "Unconfined compressive strength of clayey soils stabilized with waterborne polymer." *KSCE Journal of Civil Engineering* 16.6 (2012): 943-949.

- [15] Çakır, Murat. "Bakır Atıklarından Bakır Kazanımına Mekanik Aktivasyonun Etkisi." Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği ABD, 2010.
- [16] Kont, R., and M. Hacıoğlu. "Demir Dışı Metallerin (Cu, Pb, Zn, Al) Üretimi, Tüketimi ve Ticareti. 9." Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi Bildiriler Kitabı, İstanbul 2 (1997): 1025-1051.
- [17] Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Maden ve Tetkik Arama Genel Müdürlüğü. "Bakır." MTA, n.d., [https://www.mta.gov.tr/v3.0/metalik-](https://www.mta.gov.tr/v3.0/metalik-madenler/bakir) madenler/bakir. Accessed 23 Nov. 2025.

BÖLÜM 16

İnşaat Mühendisliğinde Yapay Zekâ Uygulamaları

**Mehmet Hayrullah Akyıldız¹ &
Muhammed Enes Türk²**

¹ Dr. Öğrt. Üyesi, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 0000-0001-7239-3518

² Arşt Gör., Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 0000-0002-1373-165X

Giriş

Son yıllarda teknolojide yaşanan hızlı ilerlemeler, mühendislik disiplinlerinin çalışma yöntemlerini köklü bir şekilde değiştirmiştir. Bu değişimin merkezinde ise yapay zekâ (YZ) yer almaktadır. Başlangıçta yalnızca bilgisayar biliminin bir alt disiplini olarak görülen yapay zekâ, günümüzde disiplinler arası bir alan haline gelmiş, özellikle veri yoğunluğu yüksek olan sektörlerde stratejik bir araç olarak kullanılmaya başlanmıştır. İnşaat mühendisliği de bu dönüşümün dışında kalmamış hem akademik düzeyde hem de sektörel uygulamalarda yapay zekânın sunduğu olanaklardan giderek daha fazla faydalanır hale gelmiştir.

İnşaat projeleri, planlama aşamasından uygulamaya, bakım ve onarımdan yıkıma kadar birçok karmaşık süreci içerisinde barındırır. Bu süreçler genellikle çok sayıda değişkene bağlı olarak ilerler ve çoğu zaman belirsizlikler, maliyet artışları ya da zaman kayıpları gibi sorunlara yol açar. Tam da bu noktada, karar destek sistemleri, tahmin modelleri ve optimizasyon araçları gibi yapay zekâ tabanlı teknolojiler, daha doğru öngörüler ve daha verimli yönetim süreçleri sunarak mühendislik kararlarını desteklemeye başlamıştır. Böylece, inşaat mühendisliği sadece yapım teknikleriyle değil, veri analitiği ve algoritmik düşünme yetkinlikleriyle de yeniden şekillenmektedir.

Özellikle büyük altyapı projelerinde, geçmiş verilerin analizi, olası gecikme senaryolarının tahmini ya da yapısal sağlık izleme sistemlerinin geliştirilmesi gibi alanlarda yapay zekâ uygulamalarına olan ilgi artmıştır. Makine öğrenmesi, yapay sinir ağları, görüntü işleme, doğal dil işleme gibi alt teknolojiler; yapıların daha güvenli, daha dayanıklı ve daha ekonomik şekilde inşa edilmesine katkı sağlamaktadır. Öte yandan, bu teknolojilerin uygulanabilirliğini artırmak için mühendislerin yalnızca yapım teknikleri konusunda değil, aynı zamanda yazılım, veri bilimi ve algoritma geliştirme konularında da donanımlı olması gerekmektedir.

Bu çalışma, inşaat mühendisliğinde yapay zekânın nasıl bir dönüşüm aracı haline geldiğini çok yönlü bir bakış açısıyla incelemektedir. Öncelikle yapay zekânın temel kavramları ve tarihsel gelişimi ele alınacak, ardından sektördeki başlıca uygulama alanları örneklerle açıklanacaktır. Son olarak, bu teknolojilerin beraberinde getirdiği avantajlar, sınırlılıklar ve gelecekteki potansiyel gelişmelere dair değerlendirmeler sunulacaktır.

Yapay Zekâ Nedir?

Yapay zekâ (YZ), makinelerin insanlara özgü düşünme, öğrenme, karar verme ve problem çözme yeteneklerini taklit edebilmesini amaçlayan bir bilim ve mühendislik alanıdır. En genel tanımıyla, bir sistemin ya da yazılımın, karşılaştığı verilerden anlam çıkararak bağımsız kararlar alabilmesi ve bu kararları sürekli olarak iyileştirebilmesi yapay zekânın temel hedefidir. Bu teknoloji, veri işleme

kapasitesinin artması ve hesaplama gücündeki ilerlemelerle birlikte günümüzde daha güçlü ve yaygın bir hâle gelmiştir.

Yapay zekâ, yalnızca tek bir teknoloji değil; çeşitli alt dallardan oluşan geniş bir ekosistemdir. Bunların başında makine öğrenmesi (machine learning) gelir. Makine öğrenmesi, sistemlerin açıkça programlanmadan, geçmiş verilerden öğrenerek yeni durumlara uyum sağlamasını mümkün kılar. Derin öğrenme (deep learning) ise, insan beynindeki sinir ağlarına benzer yapılarla çalışan ve özellikle görüntü, ses ve doğal dil işleme alanlarında büyük başarı gösteren bir alt disiplindir. Bunun dışında bulanık mantık, genetik algoritmalar, karar ağaçları ve doğal dil işleme gibi birçok yöntem, yapay zekâ sistemlerinin omurgasını oluşturur.

Yapay zekânın en önemli özelliği, statik kurallara değil, dinamik verilere dayanarak esnek çözümler üretebilmesidir. Bu yönüyle, özellikle belirsizliğin ve değişkenliğin yüksek olduğu mühendislik alanlarında önemli avantajlar sunar. Geleneksel algoritmalar sabit kurallar ve sınırlı senaryolar üzerinden çalışırken, yapay zekâ sistemleri, karmaşık ilişkileri analiz ederek beklenmedik durumlara dahi uyum sağlayabilir. Bu özellik, inşaat mühendisliği gibi çok değişkenli sistemlerin yer aldığı disiplinlerde oldukça değerli kılmaktadır.

Yapay zekânın gelişimi, yalnızca teknik kapasiteyle değil, aynı zamanda büyük veri (big data) kaynaklarının artmasıyla da hız kazanmıştır. Sensör teknolojilerinin gelişmesi, şantiyelerden ve yapı sistemlerinden elde edilen verilerin sayısını ve niteliğini artırmış; bu da yapay zekâyâ daha doğru ve çeşitli veri kümeleriyle çalışma imkânı sunmuştur. Özellikle son 10 yılda, yapay zekânın mühendislik uygulamalarındaki başarısı, onu yalnızca destekleyici bir araç olmaktan çıkararak karar alma mekanizmalarının merkezine yerleştirmiştir.

İnşaat Mühendisliğinde Yapay Zekâ Uygulama Alanları

- Proje Planlama ve Zaman Yönetimi
- Maliyet Tahmini ve Bütçelendirme
- Yapı Sağlığı İzleme (Structural Health Monitoring)
- Risk Analizi ve Güvenlik
- Malzeme ve Ekipman Optimizasyonu
- Şantiye Otomasyonu ve Robotik Sistemler
- Görüntü İşleme ile Denetim ve Kalite Kontrol

Proje Planlama ve Zaman Yönetimi

İnşaat projelerinde zaman yönetimi, maliyet kontrolü kadar kritik bir unsurdur. Projenin planlanan sürede tamamlanamaması, sadece doğrudan ekonomik kayıplara değil, aynı zamanda iş gücü, ekipman ve malzeme

planlamasında ciddi aksamalara yol açabilir. Bu nedenle doğru planlama ve etkili zaman yönetimi, inşaat mühendisliğinde başarının temel koşullarından biri olarak kabul edilmektedir.

Yapay zekâ, bu alanda geleneksel planlama yöntemlerinden çok daha esnek ve öngörücü bir yapı sunar. Özellikle makine öğrenmesi algoritmaları, geçmiş projelerden elde edilen veriler üzerinde eğitim alarak yeni projelerin zaman çizelgelerini tahmin etme konusunda yüksek doğruluk oranları sağlayabilir. Böylece, benzer nitelikteki işlerde karşılaşılan gecikme nedenleri, iş gücü performansı, hava koşulları gibi değişkenler dikkate alınarak daha gerçekçi bir proje takvimi oluşturulabilir.

Ayrıca öngörücü analiz (predictive analytics) sayesinde, proje sürecinde olası gecikmeler önceden tespit edilebilir. Bu tür sistemler, mevcut ilerleme verilerini analiz ederek, örneğin beton dökümünde yaşanan küçük bir aksamanın tüm iş takvimini nasıl etkileyebileceğini simüle edebilir. Böylece müdahale noktaları erkenden belirlenir ve gerekli aksiyonlar zamanında alınabilir.

Yapay zekâ tabanlı planlama sistemleri, geleneksel Kritik Yol Yöntemi (CPM) ya da Program Değerlendirme ve Gözden Geçirme Tekniği (PERT) gibi araçların ötesine geçerek, çok değişkenli durumları analiz edebilen dinamik bir yapıya sahiptir. Özellikle büyük çaplı projelerde, bu durum karar vericilere daha esnek, veri temelli ve sürekli güncellenebilen bir planlama aracı sunmaktadır.

Günümüzde bazı inşaat firmaları, yapay zekâ destekli yazılımlar aracılığıyla iş programlarını haftalık olarak optimize etmekte, geçmiş performansa göre şantiye içi görev dağılımlarını yeniden şekillendirmektedir. Böylece yalnızca başlangıçta değil, projenin her aşamasında yapay zekâdan faydalanılarak planlama sürekli olarak iyileştirilmektedir.

Maliyet Tahmini ve Bütçelendirme

İnşaat projelerinin başarısı yalnızca teknik yeterlilikle değil, aynı zamanda finansal kaynakların doğru planlanması ve yönetilmesiyle doğrudan ilişkilidir. Yanlış yapılmış bir maliyet tahmini, projenin bütçesinin aşılmasına, nakit akışının bozulmasına ve hatta projenin durmasına kadar varan ciddi sonuçlar doğurabilir. Bu nedenle, inşaat mühendisliğinde bütçelendirme süreçlerinin olabildiğince doğru, gerçekçi ve esnek olması gereklidir.

Geleneksel yöntemlerde, maliyet tahminleri çoğunlukla geçmiş tecrübeler, metraj hesapları ve sabit katsayılarla dayalı olarak yapılır. Ancak bu yöntemler, piyasa dalgalanmalarını, bölgesel fiyat değişkenliklerini, tedarik zinciri sorunlarını ya da şantiye bazlı operasyonel farklılıkları yeterince dikkate almaz. Bu noktada yapay zekâ destekli sistemler, dinamik ve çok değişkenli analizler yaparak daha hassas tahminler sunar.

Özellikle yapay sinir ağları (artificial neural networks) ve regresyon tabanlı öğrenme algoritmaları, geçmişteki yüzlerce hatta binlerce projeyi analiz ederek; yapı tipi, malzeme seçimi, lokasyon, işçilik durumu gibi değişkenlere göre otomatik tahmin modelleri oluşturabilir. Böylece kullanıcı, benzer parametrelere sahip yeni bir projede sistemin önerdiği yaklaşık maliyet tahminine hızlıca ulaşabilir.

Ayrıca, doğal dil işleme (NLP) teknikleriyle, geçmişteki keşif özeti, hakediş raporları veya sözleşme metinleri gibi belgelerden anlam çıkarılarak, benzer projelerde yapılan harcamalar analiz edilebilir. Bu sayede sadece sayısal değil, metinsel veriler de karar destek sistemine entegre edilir.

Yapay zekânın sağladığı bir diğer avantaj ise maliyetlerin sürekli olarak güncellenebilmesidir. Proje devam ederken tedarik maliyetlerinde ya da döviz kurlarında yaşanan değişiklikler, sisteme entegre edilerek bütçede revizyonlar yapılabilir. Bu da yöneticilere hem zamanında müdahale imkânı hem de daha sürdürülebilir bir bütçe kontrolü sağlar.

Sonuç olarak, yapay zekâ tabanlı maliyet tahmin sistemleri, yalnızca başlangıç bütçesi için değil, tüm proje boyunca maliyet kontrolü ve kaynak optimizasyonu açısından vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir.

Yapı Sağlığı İzleme (Structural Health Monitoring)

İnşaat mühendisliğinde yapı sağlığı izlemenin amacı, yapıların güvenliğini ve dayanıklılığını uzun vadede sağlamak, olası hasarları erken aşamada tespit ederek büyük problemlerin önüne geçmektir. Zamanla yapılar, çevresel etkiler (deprem, rüzgar, sıcaklık değişimleri), yüklemeler, malzeme yorulması gibi pek çok faktör nedeniyle yapısal bütünlüğünü kaybedebilir. Geleneksel yöntemler çoğunlukla periyodik görsel kontroller veya belirli aralıklarda yapılan teknik testlerle sınırlıdır. Ancak bu yöntemler, gerçek zamanlı veri sağlamadığı için arızaların veya yıpranmaların erken tespitinde yetersiz kalabilmektedir.

Yapay zekâ teknolojileri, özellikle gelişmiş sensör ağlarıyla birlikte kullanıldığında, yapı sağlığı izleme (SHM) alanında çığır açan yenilikler sunmaktadır. Sensörler aracılığıyla sürekli toplanan titreşim, sıcaklık, deformasyon ve akustik veriler gibi büyük ve çeşitli veri setleri, makine öğrenmesi algoritmaları ile analiz edilir.

Bu analizler, yapının normal çalışma durumundan sapmalarını tespit etmekte kullanılır ve böylece potansiyel arızalar önceden belirlenebilir.

Makine öğrenmesi modelleri, çeşitli hasar tiplerini ve seviyelerini tanımlamak için eğitilir. Örneğin, çatlakların büyüme hızları, bağlantı elemanlarındaki gevşemeler veya betonun dayanımındaki azalmalar gibi parametreler, algoritmalar tarafından gerçek zamanlı olarak izlenir. Derin öğrenme teknikleri

ise sensörlerden gelen yüksek boyutlu ve karmaşık verileri anlamlandırarak, yapıdaki sorunların tipini ve yeri hakkında daha detaylı bilgi sağlar.

Bunun yanında, yapay zekâ tabanlı SHM sistemleri, yapının gelecekteki performansını tahmin etmede de etkilidir. Tarihsel veriler ve mevcut durum analizleri kullanılarak, bakım ve onarım zamanları optimize edilir. Böylece sadece güvenlik sağlanmakla kalmaz, aynı zamanda bakım maliyetleri azaltılır ve yapının kullanım ömrü uzatılır.

Özellikle büyük ölçekli altyapı projelerinde (köprüler, barajlar, gökdelenler) yapay zekâ destekli yapı sağlığı izleme sistemleri kritik öneme sahiptir. Bu sistemler, insan gücüne olan ihtiyacı azaltırken, çok daha hassas, kesintisiz ve güvenilir takip yapılmasını mümkün kılar. Ayrıca, felaket öncesi erken uyarı mekanizmalarının geliştirilmesinde de yapay zekâ önemli bir rol oynar.

Sonuç olarak, yapı sağlığı izlemede yapay zekâ, veri işleme kapasitesi ve analiz yeteneği sayesinde, mühendislik kararlarını güçlendiren, riskleri azaltan ve yapıların güvenliğini artıran vazgeçilmez bir teknolojidir.

Risk Analizi ve Güvenlik

İnşaat projeleri, karmaşık yapıları ve çok sayıda değişkeni nedeniyle yüksek düzeyde risk içerir. Bu riskler, iş güvenliği, maliyet aşımaları, gecikmeler, çevresel etkiler ve malzeme kalitesi gibi birçok farklı faktörden kaynaklanabilir. Risklerin doğru tespit edilmesi ve etkin yönetilmesi, projelerin zamanında ve bütçe dahilinde tamamlanması açısından kritik öneme sahiptir. Ayrıca, çalışanların ve çevrenin güvenliğinin sağlanması, yasal yükümlülüklerin yerine getirilmesi ve itibarın korunması açısından da vazgeçilmezdir.

Geleneksel risk analizi yöntemleri çoğunlukla uzman görüşlerine, geçmiş deneyimlere ve istatistiksel modellere dayanırken, bu yöntemler genellikle verinin karmaşıklığını ve dinamik değişkenleri yeterince yakalayamamaktadır. Yapay zekâ, büyük veri işleme kapasiteleri ve öğrenme yetenekleri sayesinde, risklerin çok daha kapsamlı ve hızlı analiz edilmesini sağlar.

Makine öğrenmesi algoritmaları, geçmiş projelerden toplanan kapsamlı veri setlerini kullanarak, risk faktörleri arasındaki karmaşık ilişkileri keşfedebilir ve benzer projelerde ortaya çıkabilecek tehlikeleri yüksek doğrulukla tahmin edebilir. Bu sayede proje yöneticileri, risklere karşı proaktif stratejiler geliştirme fırsatı bulur.

İş güvenliği özelinde, yapay zekâ tabanlı görüntü işleme ve sensör teknolojileri şantiye alanında çalışanların güvenlik ekipmanlarını doğru şekilde kullanıp kullanmadığını, tehlikeli bölgelerde bulunup bulunmadığını gerçek zamanlı olarak izler. Örneğin, düşme riski taşıyan bölgelerde işçi hareketlerini takip ederek potansiyel kazaları önceden uyarır. Bu sistemler, ayrıca çevresel

koşullardaki ani değişiklikleri (örneğin, şiddetli rüzgar, yağmur) tespit ederek iş güvenliği protokollerinin devreye sokulmasını sağlar.

Çevresel riskler açısından yapay zekâ; toprak kayması, sel, deprem gibi doğal afetlerin olasılıklarını değerlendirerek, önleyici tedbirlerin ve acil durum planlarının oluşturulmasına yardımcı olur. Ayrıca, maliyet risklerinin yönetilmesinde de yapay zekâ sistemleri, tedarik zinciri aksamaları, fiyat dalgalanmaları ve bütçe sapmalarını öngörerek finansal kaynakların daha etkin kullanılmasını sağlar.

Yapay zekâ destekli risk yönetimi sistemleri, inşaat sürecinde karar alma mekanizmalarını güçlendirir, insan kaynaklı hataları minimize eder ve genel proje performansını artırır. Bu teknolojiler sayesinde, risklerin hem iş güvenliği hem de ekonomik boyutlarıyla etkin kontrolü sağlanarak, sürdürülebilir ve güvenli inşaat projeleri gerçekleştirilir.

Proje Yönetiminde Yapay Zekâ Uygulamaları

İnşaat projeleri, yüksek maliyet, karmaşık iş akışları ve çok sayıda paydaşla iş birliğini gerektiren dinamik süreçlerdir. Bu süreçlerde planlama, zamanlama, maliyet kontrolü, kaynak yönetimi ve risk analizi gibi birden fazla kritik unsurun etkin şekilde yönetilmesi gerekir. Geleneksel yöntemler çoğunlukla insan deneyimi ve geçmiş verilere dayansa da karmaşıklığın artmasıyla beraber hata oranları yükselmekte, proje gecikmeleri ve maliyet sapmaları kaçınılmaz olmaktadır. Bu noktada yapay zekâ, proje yönetiminde etkin karar alma, otomasyon ve öngörü kabiliyeti sunarak sektörde dönüşüm yaratmaktadır.

Yapay zekâ destekli proje yönetimi sistemleri, büyük veri analizi ve makine öğrenmesi algoritmaları sayesinde proje sürecindeki çok sayıda değişkeni aynı anda değerlendirebilir. Bu algoritmalar, geçmiş projelerden toplanan verilerle eğitilerek, benzer proje koşullarında karşılaşılabilecek olası gecikmeler, maliyet artışları ve kaynak darboğazları gibi riskleri önceden tespit edebilir. Böylece, proje yöneticileri gerçekçi ve dinamik planlar hazırlayarak kaynaklarını daha verimli kullanabilir.

Zaman yönetiminde, yapay zekâ tabanlı kritik yol analizi ve optimizasyon teknikleri, projedeki olası darboğazları erken aşamada belirler. Alternatif senaryolar üreterek en uygun iş akışını önerir ve proje takviminin aksamasını minimize eder. Bu sistemler ayrıca tedarik zincirindeki gecikmeleri, hava koşullarını ve saha koşullarını göz önünde bulundurarak gerçek zamanlı güncellemeler sağlar.

Maliyet kontrolü açısından yapay zekâ, bütçe sapmalarını önceden öngörerek maliyet planlamasının daha doğru yapılmasına katkı sağlar. Tedarikçi performansı, malzeme fiyat dalgalanmaları ve işçilik verimliliği gibi faktörler analiz edilerek finansal riskler minimize edilir.

Proje ilerleyişine dair otomatik raporlama sistemleri ise anlık veri akışıyla yöneticilere detaylı görselleştirilmiş bilgiler sunar. Bu sayede, karar alma süreci hızlanır ve sorunlar ortaya çıkmadan müdahale edilebilir.

İş güvenliği ve risk yönetimi de yapay zekânın önemli uygulama alanlarındandır. Saha verilerinin analiziyle riskli bölgeler ve durumlar belirlenerek işçilere erken uyarılar gönderilir. Böylece, iş kazaları ve yaralanmaların önlenmesine katkı sağlanır.

Sonuç olarak, yapay zekâ projelerin planlama aşamasından tamamlanmasına kadar tüm süreçlerde proaktif, esnek ve verimli bir yönetim sağlar. Bu teknolojiler sayesinde, projelerin başarı oranı artmakta, maliyetler düşmekte ve iş güvenliği standartları yükselmektedir. İnşaat sektörü, yapay zekâ entegrasyonu ile geleceğin daha akıllı, sürdürülebilir ve güvenli projelerine doğru ilerlemektedir.

Yapay Zekâ ile Yapısal Sağlamlık ve Tasarım Optimizasyonu

İnşaat mühendisliğinde yapısal sağlamlık ve tasarım optimizasyonu, yapıların güvenliğinin sağlanması, malzeme kullanımının verimli hale getirilmesi ve maliyetlerin minimize edilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Geleneksel mühendislik yaklaşımları, yapı tasarımını standart hesaplamalar, deneyimler ve yönetmeliklere dayandırırken, karmaşık projelerde bu yöntemler bazen yetersiz kalmakta, zaman alıcı olmakta ve yenilikçi çözümlerin ortaya çıkmasını zorlaştırmaktadır. Yapay zekâ (YZ) ise bu sorunlara yenilikçi çözümler getirerek, tasarım süreçlerini hem hızlandırmak hem de kaliteyi artırmak amacıyla giderek daha yaygın kullanılmaktadır.

Yapay Zekanın Tasarım Optimizasyonundaki Rolü

YZ tabanlı optimizasyon algoritmaları, özellikle genetik algoritmalar, yapay sinir ağları (YSA), bulanık mantık ve parçacık sürü optimizasyonu gibi teknikler, çok sayıda değişkeni ve kısıtlamayı aynı anda değerlendirebilme yetenekleri sayesinde karmaşık yapısal sistemlerde optimal tasarım çözümleri bulabilmektedir. Geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında, bu algoritmalar daha hızlı ve daha kapsamlı bir arama yaparak tasarım uzayında yer alan olası çözümleri inceler. Örneğin, farklı malzeme türlerinin kombinasyonu, kesit boyutları, destek sistemleri ve bağlantı detayları gibi parametreler optimize edilerek minimum ağırlıkla maksimum dayanıklılık elde edilebilir.

Genetik algoritmalar (GA) bu alanda yaygın olarak kullanılır; GA, biyolojik evrim sürecinden esinlenerek tasarım parametrelerini "gen" olarak kabul eder

Bu yöntem, özellikle çok amaçlı optimizasyonlarda (örneğin, maliyet ve dayanıklılık arasında denge kurma) oldukça etkilidir. YSA ise karmaşık yapısal davranışları öğrenme ve modelleme kapasitesiyle, örneğin yapıların farklı yük altındaki performansını tahmin etmede kullanılabilir.

Yapısal Sağlamlığın Yapay Zekâ ile Değerlendirilmesi

Yapay zekâ, yapısal sağlamlık değerlendirmesinde de büyük kolaylıklar sağlar. YSA ve makine öğrenmesi modelleri, deneysel veriler ve simülasyon sonuçları kullanılarak eğitilebilir ve böylece gerçek yapıların farklı yükleme durumlarındaki tepkilerini önceden tahmin edebilir. Bu yaklaşımlar, özellikle deprem, rüzgâr ve diğer dinamik yükler altında yapısal davranışın modellenmesinde geleneksel yöntemlere kıyasla daha hızlı ve kapsamlı analizler sunar.

Bunun yanında, yapay zekâ tabanlı yapısal sağlık izleme sistemleri (Structural Health Monitoring- SHM), sensörlerden toplanan verileri analiz ederek yapıdaki hasarları veya yıpranmaları erken safhada tespit eder. Örneğin, beton çatlakları, çelik korozyonu veya bağlantı zayıflamaları gibi durumlar anında raporlanabilir. Bu sistemler, yapının güvenliğini artırmakla kalmaz, bakım maliyetlerini düşürür ve beklenmedik arızaların önüne geçer.

BIM ve Yapay Zekâ Entegrasyonu ile Tasarım Sürecinin Geliştirilmesi

BIM (Building Information Modeling) teknolojisi, yapının tüm yaşam döngüsü boyunca dijital bir modelini oluşturur ve bu modelin içerisine farklı disiplinlerden veri ve parametreler entegre edilir. Yapay zekâ, BIM ile entegre çalışarak tasarım optimizasyonunda yeni bir boyut kazandırır. Örneğin, BIM modellerinden elde edilen kapsamlı veri, YZ algoritmalarına gerçek zamanlı geri bildirim sağlayarak tasarımda esneklik ve doğruluk artır.

YZ destekli BIM uygulamaları, çatışma tespiti (clash detection), malzeme optimizasyonu ve enerji verimliliği analizlerinde büyük avantaj sağlar. Ayrıca, sürdürülebilir tasarım hedefleri doğrultusunda enerji tüketimi, karbon ayak izi ve çevresel etkiler yapay zekâ algoritmaları ile analiz edilip optimize edilebilir.

Uygulama Örnekleri ve Geleceğe Yönelik Trendler

Yapay zekâ ile tasarım optimizasyonu konusunda pek çok araştırma ve uygulama mevcuttur. Örneğin, yüksek katlı binaların rüzgâr yüklerine karşı dayanıklılığını optimize etmek için genetik algoritmalar kullanılmış ve malzeme kullanımı yüzde 20'ye kadar azaltılmıştır. Bir başka örnekte ise yapay sinir ağları, betonun dayanımını ve çatlak gelişimini önceden tahmin etmek için kullanılmış, böylece bakım ve onarım süreçleri daha etkili planlanmıştır.

Gelecekte, yapay zekânın daha gelişmiş sensör teknolojileri, artırılmış gerçeklik (AR) ve nesnelerin interneti (IoT) ile entegrasyonu, yapısal tasarım ve sağlamlık alanında devrim yaratacaktır. Bu teknolojiler, yapılarla gerçek zamanlı etkileşim kurarak, tasarımın ve bakımın sürekli olarak optimize edilmesini sağlayacaktır. Ayrıca, yapay zekâ destekli otomatik tasarım sistemleri, mühendislerin daha yaratıcı ve yenilikçi çözümler üretmesine olanak tanıyacaktır.

Yapay Zekâ Destekli İnşaat Malzemeleri ve Kalite Kontrolü

İnşaat projelerinin başarısı, kullanılan malzemelerin kalitesi ve dayanıklılığı ile doğrudan ilişkilidir. Geleneksel kalite kontrol yöntemleri, genellikle fiziksel testler ve deneylere dayanmakta olup hem zaman hem de maliyet açısından sınırlamalara sahiptir. Yapay zekâ (YZ), malzeme kalitesinin daha hızlı, hassas ve otomatik şekilde değerlendirilmesine imkân tanıyarak inşaat sektöründe kalite kontrol süreçlerini dönüştürmektedir.

Yapay Zekâ ile Malzeme Performans Tahmini

Yapay zekâ algoritmaları, beton, çelik, kompozit malzemeler gibi inşaatta yaygın kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerini, dayanımını ve yaşlanma süreçlerini modelleyebilir. Örneğin, yapay sinir ağları (YSA), malzeme bileşimindeki farklı parametreleri kullanarak malzemenin basınç dayanımını, çekme dayanımını ve sünekliğini tahmin edebilir. Bu sayede laboratuvar testlerine gerek kalmadan ön analizler yapılabilir, malzeme seçiminde hız ve doğruluk artar.

Makine öğrenmesi modelleri, üretim süreçlerindeki değişkenlerin malzeme kalitesine etkisini analiz ederek, kalite sapmalarını önceden tespit eder. Örneğin, betonun karışım oranları, kürlenme süresi ve çevresel koşullar gibi faktörler modellenerek optimum karışım formülleri geliştirilebilir. Böylece malzeme üretiminde standardizasyon ve kalite artışı sağlanır.

Görüntü İşleme ve Anomali Tespiti

Yapay zekâ destekli görüntü işleme teknikleri, yapı malzemelerindeki çatlak, delaminasyon, korozyon ve yüzey kusurlarını otomatik olarak tespit eder. Drone ve insansız hava araçları (İHA) ile elde edilen yüksek çözünürlüklü görseller, yapay zeka algoritmaları ile analiz edilerek hızlı ve kapsamlı kalite kontrol yapılabilir. Bu yöntemler, insan hatasını minimize eder ve erişilmesi zor bölgelerde bile detaylı inceleme imkanı sunar.

Özellikle derin öğrenme temelli konvolüsyonel sinir ağları (CNN), malzeme yüzeyindeki mikroskobik kusurları yüksek doğrulukla tanımlayarak erken aşamada müdahale imkanı sağlar. Bu teknoloji, hem üretim hem de inşaat sahasında kalite güvencesini artırmaktadır.

Otomasyon ve Süreç İyileştirme

Yapay zekâ, kalite kontrol süreçlerini otomatikleştirerek zaman ve iş gücü tasarrufu sağlar. Otomatik hata tespiti ve raporlama sistemleri, anlık verilerle kalite standartlarından sapmaları bildirir ve düzeltici aksiyonların hızlıca alınmasını mümkün kılar. Böylece projelerde gecikmeler ve maliyet artışları önlenir.

Ayrıca, yapay zekâ ile veri analitiği kullanılarak üretim ve tedarik süreçleri optimize edilir. Malzeme stok yönetimi, teslimat planlaması ve saha kullanımı gibi alanlarda karar destek sistemleri oluşturulur. Bu sistemler, kaliteyi artırırken süreç verimliliğini de yükseltir.

Gelecek Perspektifi

İleriye dönük olarak, yapay zekâ destekli malzeme bilimi ve kalite kontrol sistemlerinin, sensör teknolojileri ve IoT ile entegrasyonu ile gerçek zamanlı ve sürekli kalite izleme sağlayacağı öngörülmektedir. Akıllı malzemeler ve kendi kendini onarabilen yapı elemanları gibi yenilikçi teknolojiler de yapay zekânın rehberliğinde geliştirilecektir.

Sonuç olarak, yapay zekâ inşaat malzemeleri alanında kaliteyi artırmak, üretim ve kontrol süreçlerini hızlandırmak için kritik bir araç olarak ön plana çıkmaktadır. Bu sayede, dayanıklı, güvenli ve ekonomik yapılar inşa edilmesi mümkün olacaktır.

Yapay Zeka ve İnşaat Proje Yönetimi

İnşaat projeleri, kapsamaları gereği karmaşık ve çok disiplinli yapıya sahiptir. Proje planlama, kaynak yönetimi, zamanlama, maliyet kontrolü ve risk analizi gibi süreçler, projenin başarısını doğrudan etkileyen temel unsurlardır. Geleneksel proje yönetim yöntemleri, bu karmaşıklığı yeterince yönetmekte zorlanırken, yapay zekâ (YZ) teknolojileri, büyük veri analitiği ve tahmin modelleriyle proje yönetiminde önemli iyileştirmeler sağlamaktadır.

Yapay Zeka Destekli Proje Planlama ve Zaman Yönetimi

YZ algoritmaları, geçmiş projelerden toplanan büyük veri setlerini analiz ederek, benzer projelerde karşılaşılan zorlukları ve başarı faktörlerini belirler. Bu sayede, yeni projeler için daha gerçekçi ve dinamik proje planları oluşturulabilir. Makine öğrenmesi modelleri, iş paketlerinin sürelerini, gecikme olasılıklarını ve kaynak ihtiyacını tahmin ederek, proje yöneticilerinin daha etkin kararlar almasını sağlar.

Özellikle karmaşık şantiyelerde, kaynakların (iş gücü, malzeme, makine) optimal dağıtımı ve çakışan işler arasındaki koordinasyon, yapay zekâ destekli sistemlerle kolaylaştırılır. Bu sistemler, senaryo analizi yaparak en uygun iş akışını belirler ve potansiyel gecikmeleri önceden tespit eder.

Risk Yönetiminde Yapay Zeka Uygulamaları

İnşaat projelerinde risklerin doğru tanımlanması ve yönetimi, başarının anahtarıdır. Yapay zekâ tabanlı risk analiz araçları, projenin her aşamasında ortaya çıkabilecek teknik, finansal, çevresel ve güvenlik risklerini erken safhada tahmin eder. Büyük veri ve doğal dil işleme (NLP) teknikleri, proje dokümanları, raporlar ve haber kaynaklarından anlamlı veriler çıkararak risk profili oluşturur.

Bu modeller, risklerin olasılık ve etkilerini hesaplayarak, proje yöneticilerine öncelikli müdahale alanlarını gösterir. Ayrıca, yapay zekâ ile desteklenen karar destek sistemleri, risklerin azaltılması için en uygun stratejileri önerir.

Maliyet Kontrolü ve Kaynak Optimizasyonu

YZ algoritmaları, proje bütçesinin etkin kullanımını sağlamak için maliyet tahmini ve kontrolünde önemli katkılar sunar. Gerçek zamanlı veri analizleri ile harcamalar izlenir ve bütçe sapmaları anında raporlanır. Böylece, finansal yönetimde şeffaflık ve kontrol artar.

Ayrıca, yapay zekâ kaynak optimizasyonunda, malzeme ve iş gücü planlamasında kaynak israfını minimize eder. Proje sürecindeki dinamik değişikliklere hızlı yanıt vererek, maliyet ve zaman kayıplarını önler.

Gelecekte Yapay Zeka ile Proje Yönetimi

Gelecekte, yapay zekâ tabanlı proje yönetim sistemlerinin artırılmış gerçeklik (AR), sanal gerçeklik (VR) ve nesnelerin interneti (IoT) ile entegrasyonu yaygınlaşacaktır. Bu entegrasyon, saha verilerinin anlık olarak toplanması ve görselleştirilmesini sağlayarak proje yönetiminde büyük bir devrim yaratacaktır. Proje yöneticileri, sahadaki durumları gerçek zamanlı izleyip hızlı müdahalelerde bulunabilecek, böylece hata ve gecikmeler minimize edilecektir.

Sonuç olarak, yapay zekâ destekli proje yönetimi, inşaat projelerinin başarı oranını artıran, riskleri azaltan ve kaynak kullanımını optimize eden vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir.

Yapay Zeka Destekli Enerji Verimliliği ve Sürdürülebilirlik Uygulamaları

Enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik, günümüz inşaat sektörünün en öncelikli hedefleri arasında yer almaktadır. Küresel iklim değişikliği, artan enerji maliyetleri ve çevresel düzenlemeler, binaların tasarımından işletmesine kadar tüm aşamalarda enerji tüketiminin optimize edilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda yapay zekâ (YZ) teknolojileri, enerji yönetimi süreçlerini daha akıllı, etkin ve ekonomik hale getirmektedir.

Yapay Zeka ve Enerji Tüketimi Optimizasyonu

Yapay zekâ, bina otomasyon sistemlerinde kullanılan sensörlerden elde edilen büyük veri kümelerini analiz ederek enerji tüketim modellerini belirler. Makine öğrenmesi algoritmaları, bu verileri kullanarak enerji kullanımındaki anormallikleri tespit eder ve sistemlerin gereksiz enerji tüketimini azaltmak için otomatik ayarlamalar yapar. Özellikle HVAC sistemleri, aydınlatma ve elektrikli cihazlar gibi yüksek enerji tüketen alanlarda YZ tabanlı kontrol sistemleri, enerji tasarrufu sağlar.

Örneğin, bina içindeki hareket sensörleri ve sıcaklık ölçerler sayesinde, yapay zekâ gereksiz enerji harcayan alanları tespit ederek, boş odaların ısıtılmasını ve iklimlendirmesini kapatabilir. Ayrıca, kullanıcı alışkanlıklarını öğrenerek bina içi iklimlendirme sistemlerini dinamik olarak optimize eder.

Sürdürülebilir Tasarımda Yapay Zeka

Bina tasarım sürecinde kullanılan YZ destekli simülasyon ve modelleme araçları, enerjinin etkili kullanılması açısından büyük avantaj sağlar. Güneş ışınımı, rüzgar hızı, dış sıcaklık ve yapı malzemelerinin termal özellikleri gibi çevresel parametreler, yapay zekâ algoritmalarıyla analiz edilerek optimum bina formu ve cephe tasarımı belirlenir. Böylece, pasif ısıtma-soğutma teknikleriyle enerji ihtiyacı azaltılır.

Ayrıca, sürdürülebilir malzeme seçiminde YZ, yaşam döngüsü analizlerini hızlandırır ve çevresel etkisi düşük alternatifler sunar. Malzeme üretiminden, inşaat aşamasına ve bina kullanımına kadar olan tüm süreçlerde karbon ayak izini minimize etmek için karar destek sistemi olarak görev yapar.

Yenilenebilir Enerji ve Akıllı Entegrasyon

Yapay zekâ, binaların yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegrasyonunda da kritik bir rol oynar. Güneş enerjisi ve rüzgar türbinlerinden elde edilen enerji miktarının tahmin edilmesi, enerji depolama sistemlerinin yönetimi ve tüketim dengesi yapay zekâ algoritmaları tarafından optimize edilir. Bu sayede, enerji üretimi ile tüketimi arasında gerçek zamanlı denge sağlanır, aşırı üretim veya enerji açığı durumları minimize edilir.

Özellikle mikro şebeke sistemlerinde, YZ ile enerji akışı kontrol edilir, tüketicilerin talep tepkileri analiz edilir ve enerji verimliliği maksimize edilir. Bu teknolojiler, binaların enerji bağımsızlığına yaklaşmasını sağlayarak sürdürülebilirlik hedeflerine katkıda bulunur.

Karşılaşılan Zorluklar ve Gelecekteki Yönelimler

Enerji verimliliği alanında YZ uygulamaları büyük potansiyele sahip olsa da, veri kalitesi, sistem entegrasyonu ve kullanıcı kabulü gibi çeşitli zorluklar bulunmaktadır. Büyük veri analizi için yeterli ve doğru verinin sağlanması, farklı bina otomasyon sistemlerinin uyumlu çalışması, kullanıcıların teknolojiyi benimsemesi gibi konular çözülmelidir.

Gelecekte, yapay zekâ destekli enerji yönetim sistemlerinin, nesnelerin interneti (IoT), artırılmış gerçeklik (AR) ve blokzincir gibi teknolojilerle entegre edilmesi beklenmektedir. Bu entegrasyon, enerji tüketiminin çok daha hassas ve güvenilir biçimde izlenip kontrol edilmesini sağlayacaktır.

Sonuç olarak, yapay zekâ tabanlı enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik uygulamaları, hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik tasarruf açısından inşaat sektöründe devrim yaratmaktadır.

Yapay Zeka ile Yapısal Sağlamlık ve Dayanıklılık Analizleri

Yapısal sağlamlık ve dayanıklılık, inşaat mühendisliğinin temel taşlarından biridir. Binaların ve altyapıların güvenli, ekonomik ve uzun ömürlü olması için tasarım ve analiz süreçlerinde hassas ve doğru yöntemler kullanılması gerekmektedir. Geleneksel yöntemler, karmaşık yapı sistemlerinin davranışını tam anlamıyla öngörmekte yetersiz kalabilmekte ve uzun süren analiz süreçleri gerektirmektedir. Yapay zekâ (YZ) teknolojileri, bu alanda daha hızlı, hassas ve kapsamlı çözümler sunarak yapısal analizlerin etkinliğini artırmaktadır.

Yapay Zekâ Tabanlı Yapısal Analiz Yöntemleri

Makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmaları, büyük veri setleri ve simülasyon sonuçlarından öğrenerek yapıların statik ve dinamik davranışlarını tahmin etmede kullanılmaktadır. Bu algoritmalar, malzeme özelliklerindeki varyasyonlar, yüklemeler ve sınır koşullarının etkilerini hızlı şekilde modelleyebilmekte ve geleneksel analiz yöntemlerine kıyasla zaman ve maliyet avantajı sağlamaktadır.

Örneğin, yapay sinir ağları (YSA) ve destek vektör makineleri (SVM), betonarme ve çelik yapıların taşıma kapasitesinin tahmini, yorgunluk analizi ve hasar tespiti gibi alanlarda başarılı uygulamalar göstermektedir (Kou, Chen & Zhang, 2020). Ayrıca, yapısal sağlık izleme sistemlerinde YZ, sensörlerden gelen verileri işleyerek yapının mevcut durumunu gerçek zamanlı değerlendirmekte ve olası arızaları erken dönemde tespit etmektedir.

Hasar Tespiti ve Onarım Optimizasyonu

Yapay zekâ, yapısal hasar tespiti süreçlerinde özellikle görüntü işleme ve veri analizi alanlarında etkili sonuçlar vermektedir. Görüntü işleme teknikleri ile çatlak, deformasyon ve korozyon gibi yapısal kusurlar otomatik olarak tanımlanmakta ve sınıflandırılmaktadır. Bu sayede insan hatası minimize edilmekte ve bakım onarım süreçleri hızlanmaktadır.

Ayrıca, YZ algoritmaları, mevcut hasar verileri ve onarım maliyetleri ışığında en uygun onarım yöntemlerini belirlemek için optimizasyon problemleri çözmektedir. Böylece ekonomik ve teknik açıdan en verimli müdahaleler planlanabilmektedir.

Deprem ve Doğal Afetlere Karşı Dayanıklılık

Deprem mühendisliği alanında yapay zekâ, yapıların sismik performans analizlerinde ve afet sonrası hasar tahmininde yaygın olarak kullanılmaktadır. Makine öğrenmesi teknikleri, geçmiş deprem verileri ve yapı modellemeleri ile

eğitilerek, farklı deprem senaryolarında yapıların davranışını simüle etmekte ve risk değerlendirmesi yapmaktadır.

Bu sayede, deprem öncesinde dayanıklılık artırıcı tasarım stratejileri geliştirilebilmekte ve afet sonrası hızlı hasar tespiti ile kurtarma faaliyetleri etkinleştirilmektedir

Zorluklar ve Gelecekteki Yönelimler

Yapay zekâ destekli yapısal analizlerde veri kalitesi, model genelleştirilmesi ve algoritmaların doğruluğu gibi önemli zorluklar mevcuttur. Veri setlerinin çeşitliliği ve kapsamı genişletilmeli, gerçek yapı koşullarını daha iyi yansıtacak modeller geliştirilmelidir.

Gelecekte, YZ algoritmalarının sensör teknolojileri ve büyük veri analizleri ile entegrasyonu, yapısal sağlık izleme sistemlerinin daha öngörülü ve etkili olmasını sağlayacaktır. Ayrıca, gerçek zamanlı analiz ve karar destek sistemleri ile yapısal mühendislik süreçleri dijital dönüşümünü hızlandıracaktır.

Yapay zekâ, yapısal sağlamlık ve dayanıklılık analizlerinde yenilikçi çözümler sunmakta ve geleneksel yöntemlerin sınırlarını aşarak mühendislik uygulamalarında devrim yaratmaktadır. Doğru ve kapsamlı veri kullanımı ile entegrasyon sağlandığında, yapay zekâ tabanlı sistemler yapı güvenliğini artırmak ve sürdürülebilir yapılar oluşturmak için kritik öneme sahip olacaktır.

Yapay Zeka Destekli İnşaat Proje Yönetimi ve Optimizasyonu

İnşaat projeleri, kapsamı gereği karmaşık, çok disiplinli ve dinamik yapıya sahiptir. Proje yönetimi süreçlerinde zaman, maliyet ve kalite unsurlarının etkin kontrolü kritik öneme sahiptir. Geleneksel proje yönetim yöntemleri, büyük ölçekli projelerde karşılaşılan riskleri ve belirsizlikleri tam anlamıyla yönetmekte zorlanabilir. Bu noktada, yapay zekâ teknolojileri, veri analizi, tahmin ve karar destek sistemleri aracılığıyla proje yönetiminde önemli iyileştirmeler sağlamaktadır.

Yapay Zekâ Tabanlı Planlama ve Zaman Yönetimi

Yapay zekâ algoritmaları, inşaat projelerinin planlama aşamasında kaynak tahsisi, iş programı oluşturma ve kritik yol analizinde etkin kullanılmaktadır. Makine öğrenmesi teknikleri, geçmiş projelerden öğrenerek iş akışlarındaki olası gecikmeleri ve darboğazları önceden tahmin edebilmekte, böylece proaktif önlemler alınmasını sağlamaktadır.

Özellikle yapay sinir ağları ve genetik algoritmalar, karmaşık proje planlamalarında alternatif çözümler üretilip en uygun iş sıralamasını belirlemek için kullanılmaktadır bu yaklaşımlar, kaynakların optimum kullanımı ve proje süresinin minimize edilmesinde başarı sağlamaktadır.

Maliyet Tahmini ve Risk Yönetimi

İnşaat projelerinde maliyet tahmini ve risk analizi, projenin ekonomik başarısını doğrudan etkileyen faktörlerdir. Yapay zekâ, büyük veri analizleriyle maliyet parametrelerini modelleyerek, tahmin doğruluğunu artırmaktadır. Destek vektör makineleri, karar ağaçları ve regresyon modelleri gibi algoritmalar, maliyet sapmalarını önceden saptamada etkili sonuçlar vermektedir.

Ayrıca, yapay zekâ tabanlı risk yönetimi sistemleri, olası risk faktörlerini tanımlamak, değerlendirmek ve bunlara yönelik stratejiler geliştirmek için kullanılmaktadır. Bu sistemler, proje sürecindeki belirsizlikleri azaltarak, daha güvenilir karar alma süreçlerine olanak tanımaktadır.

Kaynak Yönetimi ve Optimizasyonu

Proje kaynaklarının (iş gücü, malzeme, ekipman) verimli kullanımı, inşaat sürecinin başarısı için vazgeçilmezdir. Yapay zekâ, kaynak tahsisi ve optimizasyonunda karmaşık çok değişkenli problemleri çözmek için uygundur. Genetik algoritmalar, karınca kolonisi optimizasyonu ve parçacık sürü optimizasyonu gibi meta-sezgisel yöntemler, kaynak kullanımını en üst düzeye çıkarırken israfı minimize etmektedir (Wang & Liu, 2019).

Bu yöntemler, kaynak planlamasında gerçek zamanlı veri analizi ile entegre edilerek, değişen saha koşullarına hızlı adaptasyon imkânı sunmaktadır.

İletişim ve Koordinasyonun Geliştirilmesi

Yapay zekâ, inşaat projelerinde paydaşlar arasındaki iletişim ve koordinasyon süreçlerini iyileştirmek amacıyla da kullanılmaktadır. Doğal dil işleme (NLP) ve sohbet robotları, proje belgelerinin otomatik analizi ve sorulara hızlı yanıt verilmesini sağlayarak, bilgi akışını hızlandırmaktadır.

Bunun yanı sıra, yapay zekâ destekli karar destek sistemleri, yöneticilere kapsamlı veri analizleri sunarak, karmaşık durumlarda bilinçli ve hızlı karar alınmasını desteklemektedir.

Geleceğe Yönelik Trendler ve Zorluklar

Yapay zekâ tabanlı proje yönetimi uygulamalarında veri güvenliği, model şeffaflığı ve kullanıcı adaptasyonu önemli zorluklardır. Ayrıca, sistemlerin farklı proje türlerine ve ölçeklerine uyarlanabilirliği üzerinde çalışılmaktadır.

Gelecekte, yapay zekâ ile büyük veri ve nesnelerin interneti (IoT) entegrasyonunun artırılması, gerçek zamanlı performans takibi ve otomatik uyarılma mekanizmalarının yaygınlaşmasını sağlayacaktır. Bu gelişmeler, inşaat projelerinin daha esnek, verimli ve sürdürülebilir yönetilmesini mümkün kılacaktır.

Yapay zekâ, inşaat proje yönetiminde planlama, maliyet kontrolü, risk analizi ve kaynak optimizasyonu gibi kritik alanlarda önemli avantajlar sunmaktadır.

Doğru veri kullanımı ve algoritma seçimi ile desteklenen yapay zekâ uygulamaları, inşaat sektöründe proje başarı oranlarını artırmakta ve rekabet gücünü yükseltmektedir.

KAYNAKÇA

- Alavi, A. H., & Sadeghian, A. (2022). Machine learning for concrete mix design: A review. *Construction and Building Materials*, 323, 126557. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126557>
- Bani-Hani, K. A., & Abukhreideh, M. A. (2021). Deep learning approaches for structural damage detection: State-of-the-art review. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 11, 151–178.
- Chen, B., & Lu, W. (2020). Intelligent structural health monitoring systems: Trends and future directions. *Structural Control and Health Monitoring*, 27(8), e2584. <https://doi.org/10.1002/stc.2584>
- Chou, J. S., & Ngo, T. D. (2019). Machine learning in structural engineering: Foundations and applications. *Structural Engineering International*, 29(3), 356-367. <https://doi.org/10.1080/10168664.2019.1625123>
- Demir, M., & Koseoglu, O. (2021). Artificial intelligence applications for optimizing construction scheduling and cost: A systematic review. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 35(5), 04021026. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000997](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000997)
- Elghaish, F., Omar, M., & Moselhi, O. (2020). Machine learning for cost estimation in construction projects: A review. *Automation in Construction*, 113, 103158. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103158>
- Farrar, C. R., & Worden, K. (2012). Structural health monitoring: A machine learning perspective. *John Wiley & Sons*.
- Geng, Z., & Ding, L. (2018). Artificial intelligence technologies for construction safety management: A critical review. *Automation in Construction*, 92, 1-12.
- Han, S., Wang, H., & Li, S. (2019). AI-driven optimization for sustainable construction: Current state and future prospects. *Sustainability*, 11(19), 5264.
- Kou, S., Chen, Z., & Zhang, J. (2020). Application of artificial intelligence in structural health monitoring and damage identification: A review. *Engineering Structures*, 224, 111230.
- Li, X., & Yi, J. (2019). Artificial intelligence for intelligent construction management: A review. *Automation in Construction*, 101, 109-119.
- Nguyen, T., Nguyen, T., & Ngo, T. (2020). Application of artificial intelligence in project risk management: A comprehensive review. *International Journal of Project Management*, 38(7), 408-425.
- Wang, J., & Liu, J. (2019). Optimization of resource allocation in construction projects using metaheuristic algorithms. *Journal of Construction Engineering and Management*, 145(6), 04019029

Zhang, Y., Chen, X., & Li, H. (2021). Artificial intelligence applications in construction project planning: A review. *Journal of Management in Engineering*, 37(3), 04021011.

BÖLÜM 17

Uydu Görüntüleri ile Buzul Gerilemesinin İzlenmesi: Upsala Buzulu Örneği

Gizem Eyi ¹ & İlkay Buğdaycı ²

¹ Harita Mühendisi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, Türkiye, ORCID: 0009-0009-9905-2057

² Doç. Dr., Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, Türkiye, ORCID: 0000-0001-8361-1306

GİRİŞ

İklim değışikliği, küresel ölçekte doğal sistemlerde önemli değışikliklere yol açmakta ve özellikle buzullar üzerinde belirgin etkiler göstermektedir. Buzullar, küresel iklim değışikliğinin etkilerine en hızlı tepki veren hassas hidro-klimatik sistemler arasında yer almaktadır (Bazilova & Kääb, 2022; Brighenti vd., 2019; Cauvy-Fraunié & Dangles, 2019). Buzul kütleindeki azalmanın en görünür sonuçlarından biri deniz seviyesindeki yükselme olsa da, bu süreç yalnızca kıyı bölgeleri değil; aynı zamanda buzul çevresindeki ekosistemleri, su döngüsünü ve insan yerleşimlerini de doğrudan etkilemektedir. Buzul erimesiyle yakından ilişkili önemli süreçlerden biri buzul göllerinin oluşumu ve mevcut göllerin hızlı genişlemesidir. Buzul gölleri; buzul yüzeyinde, içinde veya kenarında eriyen suyun birikmesiyle oluşan, çoğunlukla buzul, temel kaya ya da moren bariyerleri tarafından sınırlandırılan geçici su kütleleridir (Bazilova & Kääb, 2022; Bhattacharjee, 2021; Zhang vd., 2022). Bu göller hem doğal ekosistemler hem de insan faaliyetleri açısından kritik öneme sahiptir ve oluşumları potansiyel tehlikeler barındırmaktadır (Bazilova & Kääb, 2022; Benn & Evans, 2014).

Küçük Buzul Çağı'ndan günümüze, özellikle buzul önü ve moren-barajlı göllerde belirgin genişleme eğilimleri gözlemlenmektedir (Bazilova & Kääb, 2022; Zhang vd., 2022). Bu genişleme, çoğu zaman buzul gölü taşkınları (GLOF) gibi yıkıcı olayları tetikleyebilir. GLOF'lar, göl çevresindeki yerleşim birimlerinde, altyapılarda ve tarım alanlarında ciddi hasara neden olabilmekte ve etkileri kilometrelerce uzak bölgelere ulaşabilmektedir (Li vd., 2022). Dolayısıyla buzul göllerinin mekânsal ve zamansal değışimlerinin izlenmesi, hem afet riski azaltımı hem de iklim değışikliğinin etkilerinin anlaşılması açısından büyük önem taşımaktadır.

Patagonya bölgesi, hızla gerileyen buzulları ve giderek büyüyen buzul gölleri ile bu tür çalışmalar için ideal bir doğal laboratuvar niteliğindedir. Bölgedeki Upsala Buzulu, Güney Amerika'nın en büyük buzullarından biri olup son yıllarda hızlanan bir kütle kaybı ve geri çekilme süreci yaşamaktadır. Bu çalışma, Upsala Buzulu'nun gerileme dinamiklerini ve bu sürece bağlı olarak gelişen buzul gölü genişlemelerini analiz etmeyi amaçlamaktadır. Çalışmada kullanılan Sentinel-2 uydu görüntüleri, yüksek mekânsal ve spektral çözünürlükleri sayesinde buzul ve su yüzeylerindeki değışimlerin ayrıntılı bir şekilde izlenmesine olanak sağlamaktadır (Carrivick & Tweed, 2016; Harrison vd., 2017).

Literatürde buzul değışimleri ve buzul gölü dinamiklerinin uzaktan algılama yöntemleri ile incelendiği çok sayıda çalışma bulunsa da (Aniya, 1996; Baumhoer, Dietz, Dech, & Kuenzer, 2018; Bolch, 2007; Harrison vd., 2017; Kulkarni vd., 2007; Rignot, Rivera, & Casassa, 2003; Zhang vd., 2022; Zhao, Gong, Bianchini, & Yang, 2024), bölgesel ölçekte yıllık veya kısa dönemli değışimlerin yüksek çözünürlüklü güncel uydu verileriyle değerlendirilmesi konusunda hâlâ eksiklikler bulunmaktadır. Bu bağlamda, bu çalışma Upsala

Buzulu özelinde buzul erimesi ve buzul gölü genişlemesi süreçlerini güncel uydu verileri ile inceleyerek hem literatürdeki boşluğu doldurmayı hem de iklim değişikliğinin bölgesel-küresel etkilerinin daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine katkı sunmayı amaçlamaktadır.

YÖNTEM

1. Çalışma Alanı

Bu çalışmanın odak noktası, Güney Amerika'nın güneyinde, Arjantin'in Patagonya bölgesinde yer alan Upsala Buzulu'dur. Upsala Buzulu, Los Glaciares Ulusal Parkı sınırları içerisinde bulunan ve Güney Patagonya Buz Tabakası'nın (Southern Patagonian Ice Field) önemli bir parçasını oluşturan büyük bir buzul sistemidir (Aniya, 1996; Rignot vd., 2003). Yaklaşık 870 km²'lik yüzey alanı ve 60 km'yi aşan uzunluğu ile Patagonya'daki en büyük ve en dinamik buzullardan biri olarak tanınmaktadır (Aniya, 1996; Rignot vd., 2003).

Upsala Buzulu, 20. yüzyılın başlarından itibaren belirgin bir geri çekilme eğilimi göstermekte olup, bu gerileme son yıllarda hızlanmıştır. Artan hava sıcaklıkları, değişen yağış rejimleri ve bölgedeki atmosferik dolaşım modellerindeki değişiklikler, buzulun kütle kaybını hızlandıran temel faktörler arasında yer almaktadır. Bu süreçler yalnızca buzulun morfolojisini değiştirmekle kalmamakta; aynı zamanda bölgenin hidrolojik döngüsünü, tatlı su depolarını ve bu kaynaklara bağlı ekosistemleri doğrudan etkilemektedir.

Upsala Buzulu'nun çalışma alanı olarak seçilmesinin temel nedeni, buzulun bölgesel çevresel değişimlerin güçlü bir göstergesi niteliği taşımasıdır. Ayrıca, geniş yüzey alanı ve hızlı dinamikleri, uydu gözlemleri kullanılarak mekânsal ve zamansal değişimlerin ayrıntılı bir şekilde izlenmesine olanak sağlamaktadır. Sentinel-2 gibi yüksek çözünürlüklü uydu verileri sayesinde buzulun gerileme hızının belirlenmesi, buzul gölü genişlemelerinin izlenmesi ve bu süreçlerin iklim değişikliği bağlamında değerlendirilmesi mümkündür.

Bu kapsamda Upsala Buzulu, hem iklim değişikliğinin buzullar üzerindeki etkilerini incelemek hem de buzul-göl sistemlerinin gelecekteki davranışlarını anlamaya yönelik değerlendirmeler yapmak için ideal bir çalışma alanı sunmaktadır.

2. Veri Seti

Bu çalışmada, Upsala Buzulu'nun 2019 ve 2024 yıllarındaki mekânsal değişimlerini belirlemek amacıyla Sentinel-2 uydu görüntüleri kullanılmıştır. Sentinel-2, Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından Copernicus Programı kapsamında işletilen ve yüksek çözünürlüklü optik görüntüleme sağlayan iki uydudan (Sentinel-2A ve Sentinel-2B) oluşmaktadır. Bu uydu sistemi, arazi örtüsü izleme, tarım, su kaynakları yönetimi, doğal afet değerlendirmeleri ve buzul dinamiklerinin analizi gibi geniş bir uygulama alanına sahiptir.

Sentinel-2 uyduları 10 m, 20 m ve 60 m mekânsal çözünürlüklere sahip toplam 13 spektral bant içermekte olup, görünür (VIS), yakın kızılötesi (NIR) ve kısa

dalga kıızılötesi (SWIR) bölgelerini kapsamaktadır. Bu bantlar, özellikle kar–buz ayrımı, su kütlelerinin tespiti, bitki örtüsü analizleri ve yüzey değişimlerinin izlenmesi için yüksek duyarlılık sağlamaktadır.

Bu çalışmada kullanılan görüntüler, Sentinel Hub tarafından sunulan EO Browser platformu üzerinden temin edilmiştir. EO Browser, belirli tarih aralıklarında yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerine erişim, görselleştirme ve indirme imkânı sağlayan çevrimiçi bir araç olup, kullanıcıların farklı sensörlere ait geniş veri arşivlerini kolaylıkla karşılaştırmasına olanak tanımaktadır. Bu platform üzerinden, bulutsuz ve analiz için uygun olan Sentinel-2 Level-1C görüntüleri seçilmiş ve değerlendirmeye alınmıştır.

2.1. Sentinel-2 Bantları ve Özellikleri

Sentinel-2'nin spektral bantları, yüzeyin fiziksel ve biyofiziksel özelliklerini farklı dalga boylarında kaydederek su, kar, buz, bitki örtüsü ve mineral yüzeylerin hassas şekilde ayırt edilmesini mümkün kılmaktadır. Özellikle NIR (Band 8) ve SWIR bantları (Band 11 ve Band 12), buzul sınırlarının belirlenmesinde ve kar–su ayrımında kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, Upsala Buzulu'nun alan değişimlerinin tespiti sürecinde bu bantlardan yoğun şekilde yararlanılmıştır.

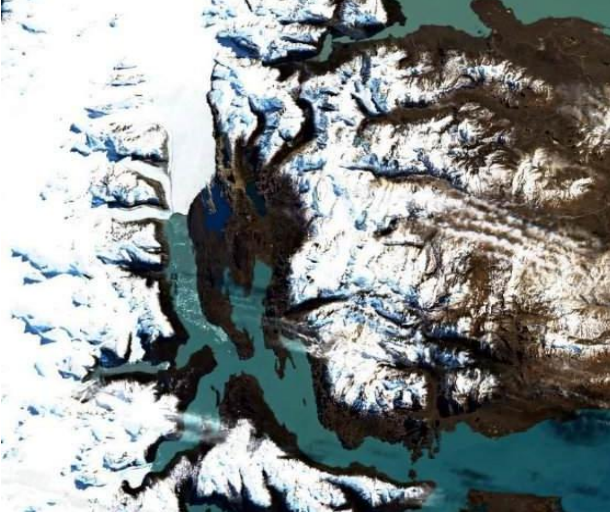
Sentinel-2'nin spektral bantları 443 nm ile 2190 nm arasındaki dalga boylarını kapsar ve her bant belirli çevresel gözlem uygulamaları için optimize edilmiştir. Bantların farklı mekânsal çözünürlükleri, geniş alanların izlenmesini mümkün kılarken aynı zamanda yüzey detaylarının hassas bir şekilde analiz edilmesine olanak tanır.

Tablo 3: Sentinel-2 bantları ve özellikleri

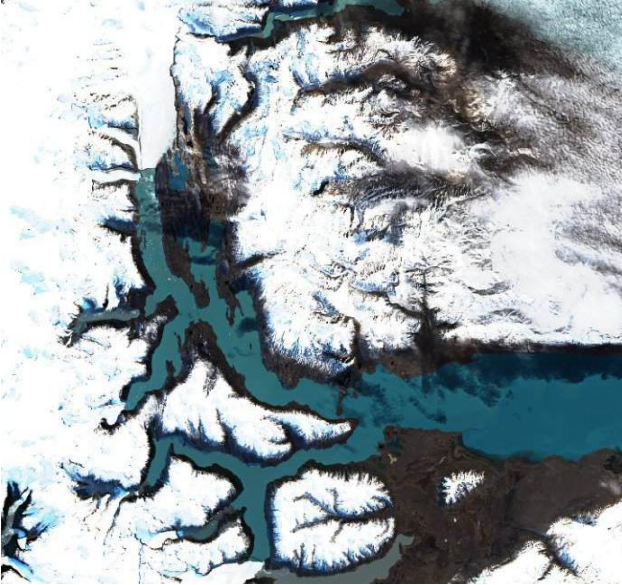
BANT NO	BANT ADI	DALGA BOYU (NM)	ÇÖZÜNÜRLÜK (M)
B1	Coastal aerosol	443	60
B2	Blue (Mavi)	490	10
B3	Green (Yeşil)	560	10
B4	Red (Kırmızı)	665	10
B5	Vegetation Red Edge	705	20
B6	Vegetation Red Edge	740	20
B7	Vegetation Red Edge	783	20
B8	Near Infrared (NIR)	842	10
B8A	Narrow NIR	865	20
B9	Water Vapor	945	60
B10	Shortwave Infrared (SWIR)	1375	60
B11	Shortwave Infrared (SWIR)	1610	20
B12	Shortwave Infrared (SWIR)	2190	20

2.2. Gerçek Renkli Görüntüler

Gerçek renkli görüntüler, insan gözüyle görülen renkleri temsil eder ve genellikle yeşil bitki örtüsü, su ve toprak gibi doğal unsurların görselleştirilmesi için kullanılır. True Color görüntüleri Sentinel-2'nin B4 (kırmızı), B3 (yeşil) ve B2 (mavi) bantlarının birleşimiyle elde edilir (Şekil 1, Şekil 2).



Şekil 1: Patagonya buzuluna ait 2019 tarihli gerçek (true color) görüntü.



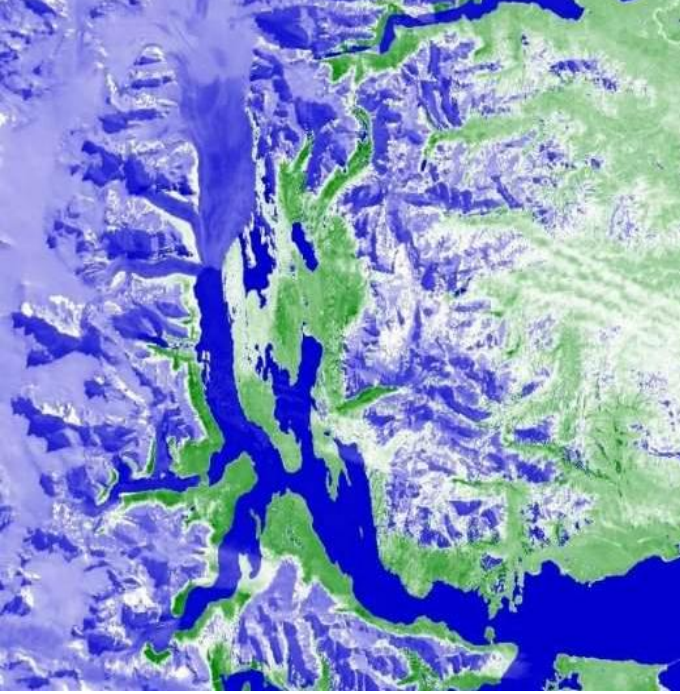
Şekil 2: Patagonya buzuluna ait 2024 tarihli gerçek (true color) görüntü.

2.3. NDWI (Normalized Difference Water Index)

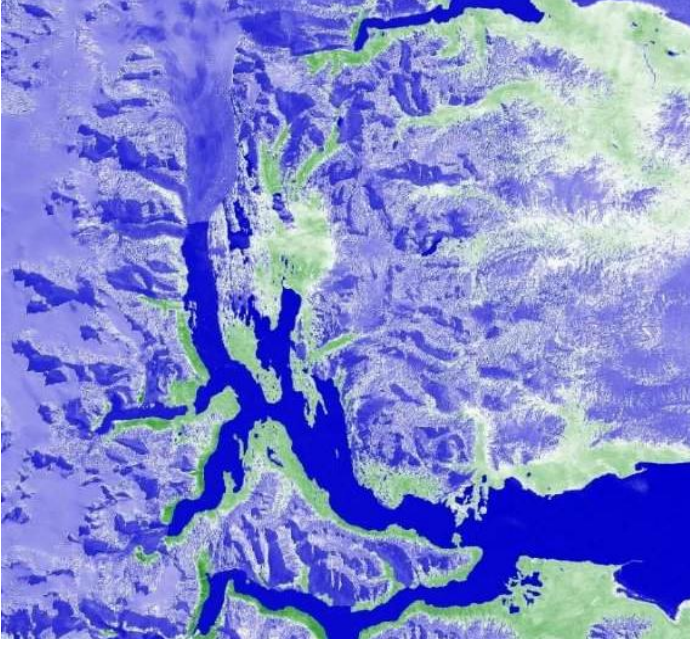
NDWI, su kütlelerinin varlığını tespit etmek için kullanılır ve su ile bitki örtüsü arasındaki kontrastı artırır (Bazilova & Kääb, 2022; Thanki et al., 2019b). NDWI şu formülle hesaplanır:

$$NDWI = \frac{(Yeşil\ Bant - Yakın\ Kızılötesi\ (NIR))}{(Yeşil\ Bant + Yakın\ Kızılötesi\ (NIR))}$$

Patagonya buzuluna ait 2019 tarihli ve 2024 tarihli NDWI analizi sonucu oluşan görüntüler Şekil 3 ve Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 3: Patagonya buzuluna ait 2019 tarihli NDWI analizi sonucu oluşan görüntü.



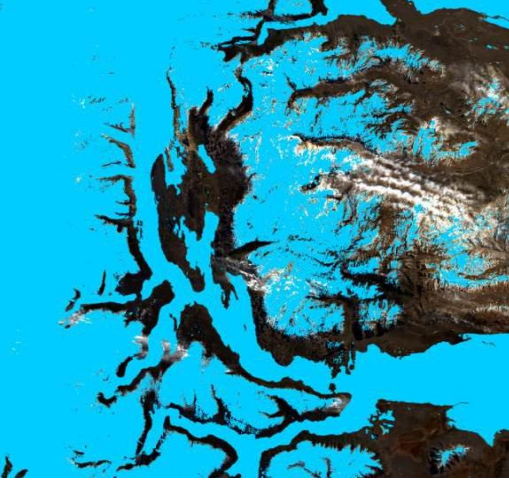
Şekil 4: Patagonya buzuluna ait 2024 tarihli NDWI analizi sonucu oluşan görüntü.

2.4. NDSI (Normalized Difference Snow Index)

NDSI, kar ve buzun tanımlanması için kullanılır ve kar yüzeylerini diğer yüzey türlerinden ayırt etmeye yardımcı olur (Bazilova & Kääb, 2022; Thanki et al., 2019b) . NDSI şu formülle hesaplanır:

$$NDSI = \frac{(Yeşil\ Bant - Kısa\ Dalga\ Kızılötesi\ Bant\ (SWIR))}{(Yeşil\ Bant + Kısa\ Dalga\ Kızılötesi\ Bant\ (SWIR))}$$

Patagonya buzuluna ait 2019 tarihli ve 2024 tarihli NDSI analizi sonucu oluşan görüntüler Şekil 5 ve Şekil 6’da görülmektedir.



Şekil 5: Patagonya buzuluna ait 2019 tarihli NDSI analizi sonucu oluşan görüntü.



Şekil 6: Patagonya buzuluna ait 2024 tarihli NDSI analizi sonucu oluşan görüntü.

3. Buzul Alanı Değişim Analizi

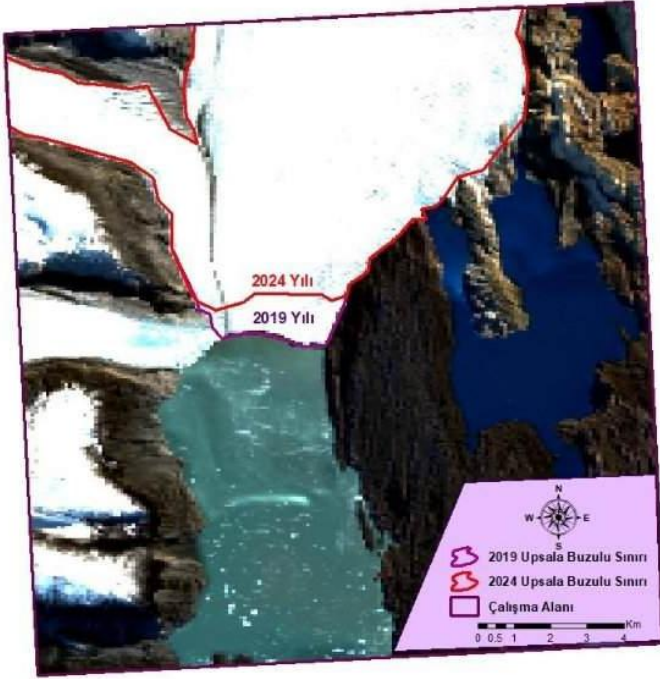
Buzul alanlarının belirlenmesi amacıyla Sentinel-2 uydu görüntüleri kullanılmış ve analiz kapsamında Normalized Difference Water Index (NDWI) ile Normalized Difference Snow Index (NDSI) hesaplanmıştır. Bu indeksler, su yüzeyleri ile kar/buz alanlarını ayırt etmede yüksek başarı sağladığından, her iki indeks çıktısı eşikleme yöntemiyle sınıflandırılmış ve buzul alanlarını temsil eden maskeler oluşturulmuştur. NDWI ve NDSI sonuçlarının birleştirilmesiyle daha doğru, gürültüden arındırılmış ve sürekliliği yüksek bir buzul sınırı elde edilmiştir.

Çalışmada 2019 ve 2024 yıllarına ait buzul sınırları ayrı ayrı çıkarılmış, sonrasında bu iki dönem karşılaştırılarak mekânsal değişim analiz edilmiştir.

ArcGIS ortamında Raster Calculator ve ilgili mekânsal analiz araçları kullanılarak yıllar arasındaki konumsal farklılıklar görsel ve sayısal olarak değerlendirilmiş; buzul sınırının ilerleme ve gerileme gösteren bölgeleri harita üzerinde net biçimde ortaya konmuştur.

Analiz sonuçları, çalışma alanında 2019–2024 döneminde buzul sınırında belirgin bir gerileme yaşandığını göstermektedir (Şekil 7. Özellikle göl ve vadi yönlerine bakan kesimlerde buzul dilinin belirgin biçimde geri çekildiği tespit edilmiştir. Bu durum, Upsala Buzulu’nun iklim değişikliğine karşı duyarlı dinamik bir yapıya sahip olduğunu ve bölgedeki buzul süreçlerinin devam eden çevresel değişimlerden doğrudan etkilendiğini ortaya koymaktadır.

2019-2024 Yılları Arası Patagonya Upsala Buzulu Alan Değişimi



Şekil 7: Patagonya buzuluna ait buzul alanı değişimi sonuç görüntüsü.

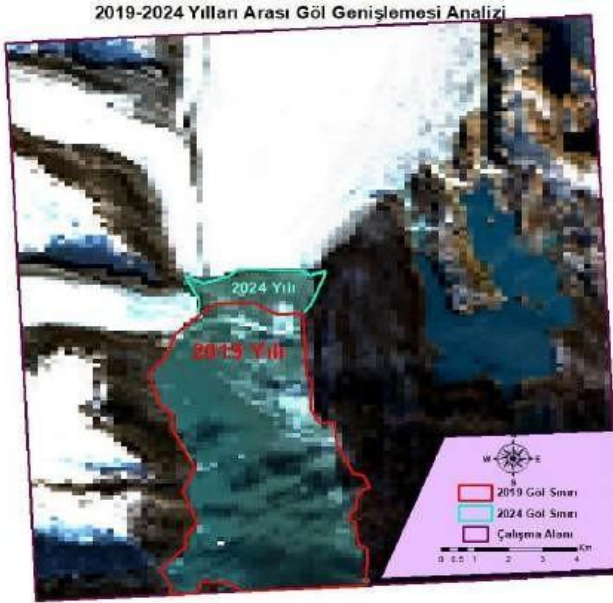
4. Buzul Göleti Değişim Analizi

Buzul göletlerinin zamansal değişimini incelemek amacıyla Sentinel-2 uydu görüntüleri kullanılmış ve su yüzeylerini tespit etmek için NDWI (Normalized Difference Water Index) hesaplamaları yapılmıştır. NDWI sonuçları üzerinde eşikleme yöntemi uygulanarak su kütleleri net bir şekilde ayrıştırılmış, böylece gölet sınırları yüksek doğrulukla haritalanmıştır.

Çalışmada 2019 ve 2024 yıllarına ait görüntüler ayrı ayrı işlenmiş ve her iki döneme ait su maskeleri karşılaştırılarak göletin mekânsal değişimi analiz

edilmiştir (Şekil 8). Bu kapsamda göl sınırlarının yıllar içindeki konumsal kaymaları, genişleme bölgeleri ve morfolojik değişimleri değerlendirilmiştir. ArcGIS ortamında Raster Calculator ve üst üste bindirme (overlay) yöntemleri kullanılarak iki dönem arasındaki farklar görselleştirilmiş ve gölün belirli alanlarda genişleme eğilimi sergilediği tespit edilmiştir.

Elde edilen haritalar, göletin 2019–2024 döneminde büyüme eğilimi gösterdiğini ve bu genişlemenin büyük ölçüde buzul erimesi ile ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Buzul geri çekilmesi ile göl alanındaki artış arasında gözlemlenen bu mekânsal ilişki, çalışmanın genel değerlendirmesi açısından önemli bir bulgu olarak ele alınmıştır.



Şekil 8: Buzul göletinin genişlemesi analizi sonuç görüntüsü.

SONUÇLAR

Bu çalışma, Patagonya'daki Upsala Buzulu'nun son yıllardaki değişimlerini inceleyerek, iklim değişikliğinin buzul ve çevresindeki göl sistemleri üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. Sentinel-2 uydu verileri kullanılarak yapılan analizler, buzul alanında belirgin bir gerileme ve buzul göllerinde genişleme eğilimini doğrulamaktadır. Bu bulgular, Upsala Buzulu'nun iklim değişikliğine karşı yüksek hassasiyetini ve erime sürecinin bölgesel su döngüsü ile çevresel sistemler üzerindeki etkilerini açıkça göstermektedir.

Google Earth zaman serisi üzerinden elde edilen terminus çizgileri, buzuldaki geri çekilmenin yalnızca son yıllarla sınırlı olmadığını, 1985–2025 döneminde kümülatif bir küçülme dinamiğinin sürdüğünü açıkça ortaya koymaktadır.

Uzun dönemli izlemeler, yüksek çözünürlüklü uydu verileri ve Google Earth zaman serileri bir arada değerlendirildiğinde, Upsala Buzulu'nun hem hacim hem yüzey alanı açısından küçülmeye devam ettiği, buzul göletinin ise genişlemeye devam ettiği açıkça görülmektedir.

Buzul alanındaki gerileme, yalnızca bölgesel bir değişimi değil, küresel ısınmanın bu hassas ekosistemler üzerindeki doğrudan etkilerini de yansıtmaktadır. Buzul göllerindeki genişleme ise, eriyen buzulların su birikimiyle bağlantılı dinamikleri ortaya koymakta ve potansiyel taşkın risklerine işaret etmektedir. Bu durum, yalnızca Upsala Buzulu'nda değil, dünya genelindeki benzer buzul ve göl sistemlerinde gözlemlenen ortak bir eğilim olarak değerlendirilebilir.

Bu çalışma, Patagonya buzullarının sürdürülebilir yönetimi ve çevresel risk analizi açısından önemli bir bilimsel dayanak sunmaktadır. Elde edilen bulgular, bölgesel su kaynaklarının yönetimi ve çevresel risk değerlendirmeleri açısından kritik öneme sahiptir. Buzul erimesi ve göl genişlemesi, taşkın riski, su temini ve ekosistem hizmetlerinin sürdürülebilirliği açısından önemli sonuçlar doğurmaktadır. Bu nedenle, buzul ve göl sistemlerinin izlenmesi ve korunması, iklim değişikliğine karşı alınacak önlemler açısından öncelikli bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır.

Çalışma ayrıca uzun dönemli gözlemlerin ve gelişmiş modellemelerin önemini vurgulamaktadır. Gelecekte yapılacak daha detaylı analizler, buzul ve göl dinamiklerinin daha ayrıntılı bir şekilde anlaşılmasını sağlayacak ve bölgesel planlama ile çevresel risk yönetimine rehberlik edecektir. Upsala Buzulu ve benzer buzullar üzerinde yürütülecek araştırmalar, iklim değişikliğinin küresel etkilerini anlamak ve bu etkileri hafifletmek için strateji geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak, bu çalışma, Upsala Buzulu ve çevresindeki göl sistemlerinin iklim değişikliğine verdiği tepkileri kapsamlı bir şekilde ortaya koymakta ve bu hassas ekosistemlerin korunmasının aciliyetini bir kez daha göstermektedir.

Kaynakça

- Aniya, M. (1996). The Use of Satellite and Airborne Imagery to Inventory Outlet Glaciers of the Southern Patagonia Icefield, South America.
- Baumhoer, C. A., Dietz, A. J., Dech, S., & Kuenzer, C. (2018). Remote Sensing of Antarctic Glacier and Ice-Shelf Front Dynamics—A Review. *Remote Sensing*, 10(9), 1445. <https://doi.org/10.3390/rs10091445>
- Bazilova, V., & Kääb, A. (2022). Mapping Area Changes of Glacial Lakes Using Stacks of Optical Satellite Images. *Remote Sensing*, 14(23), 5973. <https://doi.org/10.3390/rs14235973>
- Benn, D., & Evans, D. J. A. (2014). *Glaciers and Glaciation*, 2nd edition (2. bs). London: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203785010>
- Bhattacharjee, D. (2021). Morphological characteristics of Gangotri glacier area, Uttarakhand using GIS & Remote Sensing techniques. *American International Journal of Humanities Arts and Social Sciences*, June-August 2015, 11-16.
- Bolch, T. (2007). Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote sensing data. *Global and Planetary Change*, 56(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.009>
- Brighenti, S., Tolotti, M., Bruno, M. C., Wharton, G., Pusch, M. T., & Bertoldi, W. (2019). Ecosystem shifts in Alpine streams under glacier retreat and rock glacier thaw: A review. *Science of The Total Environment*, 675, 542-559. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.221>
- Carrivick, J. L., & Tweed, F. S. (2016). A global assessment of the societal impacts of glacier outburst floods. *Global and Planetary Change*, 144, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.07.001>
- Cauvy-Fraunié, S., & Dangles, O. (2019). A global synthesis of biodiversity responses to glacier retreat. *Nature Ecology & Evolution*, 3(12), 1675-1685. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-1042-8>
- Harrison, S., Kargel, J., Huggel, C., Reynolds, J., Shugar, D., Betts, R., ... Vilímek, V. (2017). Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods. *The Cryosphere Discussions*, 1-28. <https://doi.org/10.5194/tc-2017-203>
- Kulkarni, A. V., Bahuguna, I. M., Rathore, B. P., Singh, S. K., Randhawa, S. S., Sood, R. K., & Dhar, S. (2007). Glacial retreat in Himalaya using Indian Remote Sensing satellite data. *Current Science*, 92(1), 69-74.
- Li, D., Lu, X. X., Walling, D., Ting, Z., Steiner, J., Wasson, R., ... Bolch, T. (2022). High Mountain Asia hydropower systems threatened by climate-driven landscape instability. *Nature Geoscience*, 15, 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00953-y>

- Rignot, E., Rivera, A., & Casassa, G. (2003). Contribution of the Patagonia Icefields of South America to Global Sea Level Rise. *Science* (New York, N.Y.), 302, 434-437. <https://doi.org/10.1126/science.1087393>
- Zhang, M., Chen, F., Guo, H., Yi, L., Zeng, J., & Li, B. (2022). Glacial Lake Area Changes in High Mountain Asia during 1990-2020 Using Satellite Remote Sensing. *Research* (Washington, D.C.), 2022, 9821275. <https://doi.org/10.34133/2022/9821275>
- Zhao, F., Gong, W., Bianchini, S., & Yang, Z. (2024). Linking glacier retreat with climate change on the Tibetan Plateau through satellite remote sensing. *The Cryosphere*, 18(12), 5595-5612. <https://doi.org/10.5194/tc-18-5595-2024>

BÖLÜM 18

Matlab Kullanarak Görüntü Segmentasyon Algoritmalarının Karşılaştırılması

Serkan Keser¹

¹ Doç. Dr., Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
ORCID: 0000-0001-8435-0507

1. GİRİŞ

Görüntü işleme; dijital görüntüleri analiz etmek, yorumlamak ve bu görüntülerden anlamlı bilgiler çıkarmak için bilgisayar algoritmalarının kullanıldığı, hızla gelişen multidisipliner bir bilgisayar bilimi alanıdır. Günümüz teknolojisinde kameralar, sensörler ve tıbbi cihazlar aracılığıyla muazzam miktarda dijital görüntü verisi üretilmektedir. Bu görüntü verilerinin ham hali, bir bilgisayar için anlamsız piksel yığınlarından ibarettir. Bu veriyi "bilgiye" dönüştürme süreci, "Bilgisayarlı Görü" (Computer Vision) olarak bilinen alanın temelini oluşturur ve bu sürecin ilk adımı genellikle Görüntü Segmentasyonudur.

Görüntü Segmentasyonu (Image Segmentation), bir dijital görüntüyü benzer özelliklere (renk, doku, parlaklık, kontrast) sahip piksellerin oluşturduğu birden fazla anlamlı bölgeye veya nesneye ayırma işlemidir. Temel amaç, görüntüyü basitleştirmek ve ilgilenilen nesneleri (Regions of Interest - ROI) arka plandan veya diğer nesnelerden ayırmaktır. Başarılı bir segmentasyon, bir bilgisayarın görüntüdeki "neyin nerede olduğunu" anlaması için hayati önem taşır.

Segmentasyon işlemini gerçekleştirmenin literatürde birçok farklı yaklaşımı bulunmaktadır. Bu yaklaşımlar temel olarak iki ana kategoriye ayrılabilir:

1. **Bölge Tabanlı (Region-Based) Yaklaşımlar:** Görüntüdeki benzerlik ilkesine dayanır. *"Hangi pikseller aynı bölgeye aittir?"* sorusunu sorar. (Örn: Bölge Büyütme, Havza Algoritması).
2. **Kenar Tabanlı (Edge-Based) Yaklaşımlar:** Görüntüdeki farklılık (süreksizlik) ilkesine dayanır. *"Bir bölgenin bittiği ve diğerinin başladığı sınır (kenar) neresidir?"* sorusunu sorar.

Bu çalışmada, segmentasyonun temelini oluşturan Kenar Belirleme (Edge Detection) algoritmaları derinlemesine incelenmiştir. Kenar, bir görüntüdeki parlaklık veya renk değerlerinin aniden ve keskin bir şekilde değiştiği yer (süreksizlik) olarak tanımlanır. Bu ani değişimler, genellikle bir nesnenin bittiği ve başka bir nesnenin başladığı yerlere karşılık gelir. Dolayısıyla, bir görüntüdeki kenarları doğru bir şekilde tespit etmek; o görüntüdeki nesnelerin sınırlarını, şeklini ve konumunu belirlemenin anahtarıdır.

Kenar belirleme algoritmaları, günümüzde birçok farklı ve kritik alanda aktif olarak kullanılmaktadır. Bu kullanım alanlarının başında şunlar gelmektedir:

- **Tıbbi Görüntüleme:** MR (Manyetik Rezonans) veya BT (Bilgisayarlı Tomografi) görüntülerinde organ sınırlarının, tümörlerin veya doku anomalilerinin otomatik olarak tespit edilmesi.
- **Otonom Araçlar ve Akıllı Ulaşım:** Kendi kendine giden araçların (otonom) şeritleri, yoldaki diğer araçları, yayaları ve trafik işaretlerini algılaması.

- **Endüstriyel Otomasyon ve Kalite Kontrol:** Fabrika üretim hatlarında, devre kartı (PCB) denetimlerinde, ürünlerdeki çatlakların veya hataların tespiti ve robotik sistemlerin nesneleri tanınması.
- **Güvenlik ve Gözetim:** Otomatik Plaka Tanıma (PTS) sistemleri, yüz tanıma veya bir alandaki hareketli nesnelerin takibi.

Bu çalışmanın amacı, görüntü segmentasyonunda kullanılan temel ve gelişmiş kenar belirleme algoritmalarını teorik ve pratik olarak karşılaştırmaktır. Çalışma kapsamında; klasik gradyan tabanlı Sobel, Prewitt ve Roberts operatörleri; ikinci türev tabanlı Laplacian of Gaussian (LoG); gürültüye dayanıklı optimal bir yöntem olan Canny Algoritması; ve kural tabanlı akıllı bir yaklaşım olan Bulanık Mantık (Fuzzy Logic) metodu ele alınmıştır.

2. İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Kenar belirleme, görüntü işlemenin en temel ve en çok çalışılan problemlerinden biridir ve literatürde bu konuda çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar, genel olarak klasik operatörlerin iyileştirilmesi, gürültüye dayanıklı yeni algoritmaların geliştirilmesi ve belirli uygulama alanlarına (örn. tıp, robotik) özel metotların tasarlanması üzerine yoğunlaşmaktadır. Klasik gradyan tabanlı operatörler (Sobel, Prewitt, Roberts) uzun yıllardır yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak Canny'nin [1] öncü çalışmasında gösterildiği gibi, bu basit operatörler özellikle Gauss veya Salt & Pepper (Tuz-Biber) gürültüsü içeren görüntülerde ciddi performans kayıpları yaşamaktadır. Gürültülü pikseller parlaklıkta ani değişimlere neden olduğundan, klasik operatörler bu pikselleri sıklıkla “yanlış kenar” (false positive) olarak algılar. Canny, bu sorunu azaltmak için Gauss filtresiyle gürültü azaltma adımı da içeren, çok aşamalı ve optimum özelliklere sahip bir algoritma önermiş ve kenar belirlemede ön işleme/gürültü azaltma gerekliliğini açıkça ortaya koymuştur.

Özellikle tıbbi görüntüler (MR, BT, Ultrason) gibi düşük kontrastlı ve belirsiz sınırların bulunduğu alanlarda, Canny gibi kesin (crisp) karar veren yöntemler yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle bazı çalışmalarda [5], Bulanık Mantık (Fuzzy Logic) tabanlı kenar belirleme yaklaşımları tercih edilmiştir. Bu yöntemler, her piksel için ikili bir “kenar/kenar değil” kararı vermek yerine, pikselin [0, 1] aralığında kenar olma üyelik derecesini hesaplayarak daha esnek ve yorumlanabilir sonuçlar sunar. Böylece özellikle tümör gibi sınırların net olmadığı dokular için uzmanların kullanabileceği olasılıksal kenar haritaları elde edilir. Bu çalışmalar, belirsizlik yönetimi açısından Bulanık Mantık'ın klasik algoritmalara göre önemli üstünlükler sağlayabildiğini göstermektedir.

Son yıllarda, sadece kenar bilgisine veya sadece bölge bilgisine dayanmanın yeterli olmadığı vurgulanarak hibrit yöntemler geliştirilmiştir [3]. Örneğin, bölge tabanlı Watershed (Havza) algoritması nesneleri içten doldurabilse de, sıklıkla

aşırı segmentasyon (over-segmentation) problemine yol açar [6]. Buna karşılık, Canny gibi kenar tabanlı yöntemler sınırları iyi yakalasa da bu sınırların mutlaka kapalı kontur oluşturacağını garanti edemez. Bu nedenle Canny ile elde edilen güçlü kenarların, Watershed algoritması için “set” (engel) olarak kullanıldığı hibrit yaklaşımlar geliştirilmiştir. Böylece hem daha doğru sınırlar elde edilmesi hem de bu sınırların kapalı bölgeler oluşturması hedeflenmektedir. Genel olarak literatür, “mükemmel” tek bir kenar belirleme algoritması olmadığını, seçilecek yöntemin uygulama alanına (tıbbi görüntüler, otonom sürüş, endüstriyel denetim vb.) ve görüntünün özelliklerine (gürültü tipi, kontrast, doku yapısı) bağlı olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, tam da bu noktadan hareketle, altı farklı metodu üç farklı uygulama alanı üzerinde karşılaştırmalı olarak değerlendirerek ilgili yöntemlerin güçlü ve zayıf yönlerini sistematik biçimde ortaya koymayı amaçlamaktadır.

3. METOTLAR

Görüntü segmentasyonu için kullanılan kenar belirleme algoritmaları, temelde “kenar” kavramını matematiksel olarak nasıl tanımladıklarına göre sınıflandırılabilir. Literatürde kenar, görüntü parlaklık fonksiyonunun birinci türevinin (gradyan) maksimuma ulaştığı noktalar veya ikinci türevinin sıfırdan geçtiği (zero-crossing) noktalar olarak tanımlanır.

Bu çalışmada, hem klasik türev tabanlı yaklaşımları hem de daha gelişmiş/akıllı yöntemleri kapsayan altı temel algoritma incelenmiştir. Bu algoritmalar üç ana kategoride gruplanmaktadır:

1. **Gradyan Tabanlı (Birinci Türev) Yöntemler:** Sobel, Prewitt, Roberts
2. **Laplacian Tabanlı (İkinci Türev) Yöntemler:** LoG (Laplacian of Gaussian)
3. **Optimal ve Akıllı Yöntemler:** Canny, Bulanık Mantık (Fuzzy Logic)

3.1. Gradyan Tabanlı Yöntemler

Gradyan tabanlı yöntemler, görüntüdeki parlaklık değişim hızını (birinci türev veya gradyan büyüklüğü) ölçmeye dayanır. Temel fikir şudur: Bir pikselden komşusuna geçişte parlaklık ani değişiyorsa, bu noktada bir kenar olma olasılığı yüksektir. Bu amaçla görüntü üzerinde küçük konvolüsyon maskeleri (genellikle 3×3 kernel) gezdirilir; bu maskeler yatay (Gx) ve dikey (Gy) yönlerdeki parlaklık değişimlerini hesaplar.

3.1.1. Sobel Operatörü (Özet)

Sobel operatörü, literatürde en yaygın kullanılan gradyan operatörlerinden biridir. 3×3 boyutunda iki ayrı maske kullanarak görüntünün yatay (Gx) ve dikey (Gy) türevlerini yaklaşık olarak [2,8]. Maskenin merkez satır/sütununda yer alan ± 2

katsayıları, kenara dik yöndeki komşu piksellere daha fazla ağırlık vererek, Prewitt ve Roberts operatörlerine göre gürültüyü bir miktar bastıran ve daha pürüzsüz kenarlar üreten bir davranış sağlar.

Yatay (G_x) ve dikey (G_y) gradyanları hesaplamak için kullanılan maskeler şu şekildedir:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix}, G_y = \begin{bmatrix} +1 & +2 & +1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Bu iki maske, giriş görüntüsüne (I) ayrı ayrı uygulandıktan sonra ($I * G_x$ ve $I * G_y$), her bir pikseldeki toplam gradyan büyüklüğü (Magnitude, M), yani kenar gücü, bu iki dik bileşenin Pisagor teoremi ile birleştirilmesiyle hesaplanır:

$$M = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (2)$$

Son adımda, bu M değeri önceden belirlenmiş bir eşik (threshold) değeri ile karşılaştırılır. Eşikten büyük olan pikseller "kenar" (beyaz, 1), küçük olanlar "kenar değil" (siyah, 0) olarak işaretlenir.

MATLAB Uygulaması: MATLAB'de Image Processing Toolbox içerisinde, bu tüm adımları (maske uygulama, gradyan hesaplama ve eşikleme) otomatik olarak yapan edge fonksiyonu bulunmaktadır:

```
% I_gray: Gri tonlamalı giriş görüntüsü
BW_sobel = edge(I_gray, 'sobel');
```

3.1.2. Prewitt Operatörü

Prewitt operatörü, Sobel operatörüne yapısal olarak çok benzeyen bir diğer birinci türev (gradyan) operatörüdür [4,8]. Tıpkı Sobel gibi, 3x3 boyutunda iki ayrı maske (G_x ve G_y) kullanarak görüntünün yatay ve dikey yönlerdeki parlaklık değişimlerini hesaplar. Prewitt'in Sobel'den tek ve en önemli farkı, maske katsayılarındadır. Sobel, merkez piksellere '2' ağırlığı vererek bir yumuşatma yaparken, Prewitt tüm komşu piksellere eşit derecede('1') ağırlık verir. Bu durum, Prewitt'i hesaplama açısından biraz daha basit yapsada, gürültüye karşı Sobel'den daha hassas (daha dayanıksız) olmasına neden olur. Genellikle Sobel'e kıyasla biraz daha gürültülü kenar çıktıları üretir. Yatay (G_x) ve dikey (G_y) gradyanları hesaplamak için kullanılan maskeler (denklemler) şu şekildedir:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -1 & 0 & +1 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix}, G_y = \begin{bmatrix} +1 & +1 & +1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Maskeler uygulandıktan sonra, toplam gradyan büyüklüğü (M) yine Pisagor formülü ile hesaplanır:

$$M = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (4)$$

Ve bu M değeri, belirlenen bir eşik (threshold) değerine göre kenar (1) veya kenar değil (0) olarak sınıflandırılır. MATLAB Uygulaması: Prewitt operatörü de edge fonksiyonu ile doğrudan çağrılabilir:

```
% I_gray: Gri tonlamalı giriş görüntüsü
BW_prewitt = edge(I_gray, 'prewitt');
```

3.1.3. Roberts Operatörü

Roberts operatörü, kenar belirleme için önerilen en eski ve en basit operatörlerden biridir. Sobel ve Prewitt'in 3x3'lük maskelerinin aksine, Roberts sadece 2x2 boyutunda iki maske kullanır [8]. Bu operatör, "çapraz" (cross) olarak adlandırılır çünkü maskeleri, görüntünün sadece çapraz komşuları arasındaki farkı (+45° ve -45° yönlerdeki) hesaplar. 3x3'lük operatörler gibi bir "merkez" piksele sahip değildir; bunun yerine 2x2'lik bir piksel bloğunun çaprazları arasındaki farkı hesaplar ve sonucu o bloğun sol üst pikseline yazar. Hesaplama açısından çok hızlı olmasına rağmen, 2x2'lik küçük maskesi nedeniyle gürültüye karşı aşırı derecede hassastır. Gürültü filtreleme (yumuşatma) özelliği neredeyse hiç yoktur. Bu nedenle, genellikle sadece çok temiz veya basit geometrik şekillere sahip görüntülerde kullanılır.

$$G_x = \begin{bmatrix} +1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, G_y = \begin{bmatrix} 0 & +1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Toplam gradyan büyüklüğü (M), Sobel ve Prewitt ile aynı şekilde hesaplanır:

$$M = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (6)$$

Ve bu M değeri, belirlenen bir eşik (threshold) değerine göre kenar (1) veya kenar değil (0) olarak sınıflandırılır. MATLAB Uygulaması: Roberts operatörü de edge fonksiyonu ile doğrudan çağrılabilir:

```
% I_gray: Gri tonlamalı giriş görüntüsü
BW_roberts = edge(I_gray, 'roberts');
```

3.2. Laplacian Tabanlı Yöntem

Gradyan tabanlı (birinci türev) yöntemler kenarın varlığını (parlaklıktaki hızlı değişim) tespit ederken, Laplacian tabanlı yöntemler parlaklık değişiminin tam yerini tespit etmeye odaklanır [7]. Bu yöntemler, görüntü fonksiyonunun ikinci türevini kullanır. Matematiksel olarak, bir kenarın tam merkezi, birinci türevin maksimum (tepe noktası) olduğu yerdir. Ve bir fonksiyonun tepe noktası, o fonksiyonun ikinci türevinin sıfır olduğu (sıfırdan geçtiği) yere denk gelir. Bu olaya "Zero-Crossing" (Sıfır Geçiş) denir. Bu ailenin temel operatörü Laplacian Operatörüdür. Ancak, ikinci türev işlemi gürültüye karşı aşırı derecede hassastır (birinci türevden bile daha fazla). Görüntüdeki en ufak bir gürültü, ikinci türevde devasa bir gürültü piki yaratarak binlerce yanlış kenara (false positive) neden olur.

Bu sorunu çözmek için, Laplacian of Gaussian (LoG) algoritması geliştirilmiştir. LoG, iki adımlı bir işlemdir ve gürültü sorununu çözmek için tasarlanmıştır:

1. **Adım 1:** Gürültü Azaltma (Gaussian Blur): Görüntü, herhangi bir türev işlemi uygulanmadan *önce*, bir Gaussian filtresi (yumuşatma filtresi) ile bulanıklaştırılır. Bu işlem, gürültünün çoğunu temizler.
2. **Adım 2:** Laplacian Alma: Gürültüden arındırılmış bu görüntüye Laplacian operatörü (ikinci türev) uygulanır.

Bu iki işlem, matematiksel olarak tek bir maskede birleştirilebilir. Bu birleşik maskeye "Meksika Şapkası" (Mexican Hat) filtresi de denir, çünkü 3D grafiği bir şapkaya benzer.

LoG operatörü, gürültüyü azalttıktan sonra, ikinci türevin işaret değiştirdiği (pozitiften negatife veya negatiften pozitifte geçtiği) yerleri, yani Sıfır Geçişlerini (Zero-Crossings) arar. Bu sıfır geçişleri, kenar olarak işaretlenir. LoG'un tipik bir 5x5 maskesi (denklemleri) şu şekildedir:

$$LoG = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -2 & -1 & 0 \\ -1 & -2 & 16 & -2 & -1 \\ 0 & -1 & -2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

LoG, Canny'den farklı olarak, "ince" çizgiler yerine "kapalı" (closed contour) sınırlar üretme eğilimindedir, ancak Canny kadar keskin (thin) kenarlar vermeyebilir. MATLAB'deki edge fonksiyonu, bu iki adımı (**Gaussian + Laplacian + Zero-Crossing**) otomatik olarak yapan 'log' seçeneğine sahiptir:

% I_gray: Gri tonlamalı giriş görüntüsü

```
BW_log = edge(I_gray, 'log');
```

3.3. Optimal ve Akıllı Yöntemler

Bu kategorideki algoritmalar, Sobel veya LoG gibi tek bir matematiksel adıma (tek bir filtreye) dayanmazlar. Bunlar, daha "akıllı" ve "optimal" sonuçlar elde etmek için birden fazla adımı bir araya getiren karmaşık süreçlerdir.

3.3.1. Canny Kenar Belirleme Algoritması

John F. Canny tarafından 1986'da geliştirilen Canny algoritması, günümüzde hala en yaygın kullanılan ve "en optimal" olarak kabul edilen kenar belirleme yöntemidir. Canny'nin amacı, "iyi" bir kenar belirlemenin üç ana kriterini optimize etmektir:

1. **İyi Tespit (Good Detection):** Gerçek kenarları kaçırmamalı (düşük yanlış negatif) ve gürültüyü kenar sanmamalı (düşük yanlış pozitif).
2. **İyi Konumlandırma (Good Localization):** Tespit edilen kenar pikselleri, gerçek kenara mümkün olduğunca yakın olmalıdır.
3. **Tek Yanıt (Single Response):** Gerçekte tek olan bir kenar için, çıktıda da sadece tek bir piksel genişliğinde (ince) bir çizgi olmalıdır.

Bu hedeflere ulaşmak için Canny algoritması, tek bir filtreden ziyade dört aşamalı karmaşık bir süreç izler:

Adım 1: Gürültü Azaltma (Noise Reduction)

Adım 2: Gradyan Büyüklüğü ve Yönünü Bulma (Finding Gradient)

Adım 3: Maksimum Olmayanların Bastırılması (Non-Maximum Suppression)

Adım 4: Histeresis ile Eşikleme (Hysteresis Thresholding)

MATLAB'deki edge fonksiyonu, bu dört karmaşık adımı tek bir komutta toplar:

```
% I_gray: Gri tonlamalı giriş görüntüsü
```

```
BW_canny = edge(I_gray, 'canny');
```

3.3.2. Bulanık Mantık (Fuzzy Logic) Tabanlı Metot

Kenar belirleme için kullanılan klasik yöntemlerin (Sobel, Canny vb.) aksine, Bulanık Mantık (Fuzzy Logic) metodu, insan düşünce yapısına daha yakın, kural tabanlı bir yaklaşım sunar. Klasik yöntemler, bir pikselin "kenar" olup olmadığına dair kesin (crisp) ve ikili (binary) bir karar (0 ya da 1) verirler. Bu durum, "her şey ya siyahtır ya da beyazdır" yaklaşımıdır.

Bulanık Mantık ise, Lotfi Zadeh tarafından ortaya atılan "bulanık kümeler" teorisine dayanır ve "gri alanları" da kabul eder. Bir pikselin $[0, 1]$ aralığında "kenar olma" derecesini belirten bir üyelik değeri (membership value) almasına izin verir. Bu, "Bu piksel %70 oranında bir kenardır" gibi daha esnek ve belirsizlikle başa çıkabilen sonuçlar üretir.

Bulanık mantık tabanlı bir kenar belirleme sistemi, genellikle bir Bulanık Çıkarım Sistemi (Fuzzy Inference System - FIS) kurularak gerçekleştirilir. Bu sistemin işleyişi 3 ana adımdan oluşur:

1. Bulanıklaştırma (Fuzzification): Görüntüden elde edilen kesin bir girdi (örneğin, Sobel ile hesaplanan gradyan değeri) alınır ve "düşük", "orta" veya "yüksek" gibi bulanık dilsel ifadelerle (fuzzy sets) dönüştürülür. Bu kümeler, matematiksel olarak Üyelik Fonksiyonları (örn: gaussmf, trimf) ile tanımlanır. Bizim uygulamamızda: Her pikselin gradyan büyüklüğü (gradient) alınmış ve 'zero' (düşük) ile 'one' (yüksek) olmak üzere iki bulanık kümeye olan üyelik dereceleri hesaplanmıştır.

2. Bulanık Çıkarım (Fuzzy Inference): Önceden tanımlanmış "EĞER... O ZAMAN..." (IF... THEN...) kuralları bu bulanık girdilere uygulanır. Bu kurallar, bir uzmanın (veya bizim) o konudaki bilgisini temsil eder. Bizim uygulamamızda: Şunlara benzer iki temel kural kullanılmıştır

KURAL 1: EĞER gradyan 'zero' (düşük) İSE, O ZAMAN piksel tipi 'black' (kenar değil).

KURAL 2: EĞER gradyan 'one' (yüksek) İSE, O ZAMAN piksel tipi 'white' (kenar).

3. Durulaştırma (Defuzzification): Bulanık kurallardan elde edilen bulanık çıktı ("%70 white"), tekrar kesin bir sayıya (o pikselin alacağı $[0, 1]$ arasındaki gri ton değeri) dönüştürülür.

Bulanık Mantık'ın diğer 5 algoritmadan (Sobel, Canny, Prewitt, Roberts, LoG) temel farkları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Bulanık Mantığın diğer 5 algoritmadan temel farkları

Kriter	Klasik Yöntemler (Sobel, Canny)	Bulanık Mantık (Fuzzy Logic)
Mantık	Kesin (Crisp) / İkili (Boolean)	Bulanık (Fuzzy)
Karar	"Evet" (1) veya "Hayır" (0)	"Ne kadar?" (%0 - %100 arası)
Çıktı	Siyah-beyaz ikili (binary) görüntü	Gri tonlamalı (grayscale) olasılık haritası
Kriter	Klasik Yöntemler (Sobel, Canny)	Bulanık Mantık (Fuzzy Logic)

Dayandığı Yapı	Matematiksel Filtre (Konvolüsyon)	Kural Tabanlı Çıkarım Sistemi (FIS)
Esneklik	Düşük (Tek bir eşik değerine bağlı)	Yüksek (Kurallar ve üyelik fonksiyonları ile ayarlanabilir)
Performans (Hız)	Çok Hızlı	Çok Yavaş (Piksel piksel "düşünür")

Bu fark, özellikle medical.jpg (Tıbbi Görüntü) gibi sınırların belirsiz ve düşük kontrastlı olduğu uygulamalarda kritik önem taşır. Canny'nin ürettiği net ama gürültülü çizgi yerine, Bulanık Mantık'ın sunduğu gri tonlamalı "olasılık" haritası, bir doktor veya uzman için daha anlamlı ve yorumlanabilir bir bilgi sunabilir.

Bulanık Mantık, diğerlerinin aksine edge fonksiyonu ile çağrılmaz. MATLAB'in "Fuzzy Logic Toolbox"ı kullanılarak sıfırdan bir Çıkarım Sistemi (FIS) inşa edilmesini gerektirir.

4. UYGULAMALAR VE BULGULAR

Bu bölümde, "Bölüm 3: Metotlar" kısmında teorik altyapısı anlatılan 6 farklı kenar belirleme algoritması, MATLAB R2023b ortamında uygulanmıştır. Algoritmaların performansını ve farklı kullanım alanlarındaki davranışlarını karşılaştırmak amacıyla, üç farklı kategoriden test görüntüleri seçilmiştir:

1. Tıbbi Görüntü (medical.jpg): Düşük kontrastlı ve belirsiz sınırlara sahip bir beyin MR görüntüsü.

2. Otoyol Görüntüsü (road.jpg): Yüksek kontrastlı, net şerit çizgileri içeren bir otonom sürüş senaryosu.

3. Devre Kartı Görüntüsü (pcb.jpg): Yoğun detaylı, geometrik ve ince hatlara sahip bir endüstriyel kalite kontrol senaryosu.

Tüm uygulamalar, her bir algoritmanın bu üç görüntü üzerindeki performansını tek bir pencerede gösterecek şekilde subplot fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

4.1. Sobel Operatörü Uygulaması



Şekil 4.1. Sobel Operatörünün 3 Farklı Görüntü Üzerindeki Sonuçları

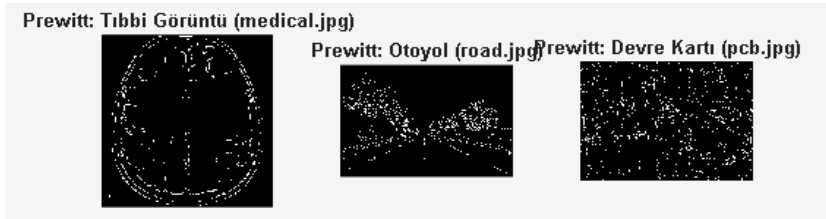
Şekil 4.1'de görüldüğü gibi, Sobel operatörü "Bölüm 3.1.1"de anlatılan klasik gradyan hesabı mantığıyla çalışmıştır.

Tıbbi Görüntü'de: Düşük kontrasta rağmen, kafatasının dış sınırı gibi güçlü kenarları başarıyla tespit etmiştir. Ancak beynin içindeki ince, zayıf kıvrımları (sulci) büyük ölçüde kaçırmıştır.

Otoyol Görüntüsü'nde: Yüksek kontrastlı yol şeritlerini bulmuş, ancak Sobel'in gürültü azaltma özelliği olmamasından dolayı, asfaltın dokusunu, ağaçların yapraklarını ve çimenleri de "kenar" olarak algılayarak son derece gürültülü bir çıktı üretmiştir.

Devre Kartı Görüntüsü'nde: Bu gürültü hassasiyeti en belirgin şekilde bu resimde ortaya çıkmıştır. Devre kartının aşırı yoğun detayı (binlerce ince yol ve lehim noktası), operatör tarafından tamamen gürültü olarak yorumlanmış ve anlamlı bir kenar tespiti yapılamamıştır.

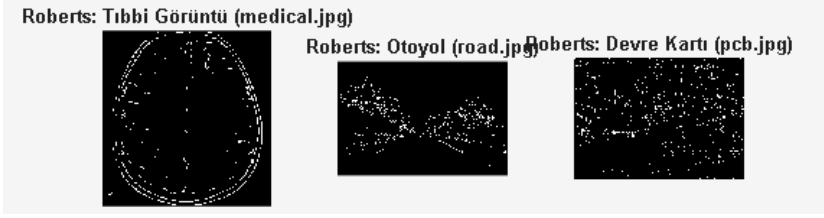
4.2. Prewitt Operatörü Uygulaması



Şekil 4.2. Prewitt Operatörünün 3 Farklı Görüntü Üzerindeki Sonuçları

Şekil 4.2'de görülen Prewitt operatörü sonuçları, beklendiği gibi Sobel (Şekil 4.1) sonuçlarına çok benzemektedir. Teoride ("Bölüm 3.1.2") açıklandığı gibi, Prewitt'in Sobel'den farkı merkez piksellere ağırlık ('2' yerine '1') vermemesidir. Bu fark, özellikle Otoyol ve Devre Kartı görüntülerinde kendini göstermiştir. Prewitt'in gürültü yumuşatma özelliği Sobel'den daha az olduğu için, bu iki görüntüdeki çıktılar Sobel'e kıyasla biraz daha gürültülü ve daha fazla "karıncalı" bir yapıya sahiptir. Tıbbi görüntüde ise Sobel ile neredeyse aynı performansı göstermiş, sadece güçlü dış kenarı bulabilmiştir. Bu durum, Prewitt'in de yüksek detaylı veya dokulu görüntüler için yetersiz kaldığını doğrulamaktadır.

4.3. Roberts Operatörü Uygulaması



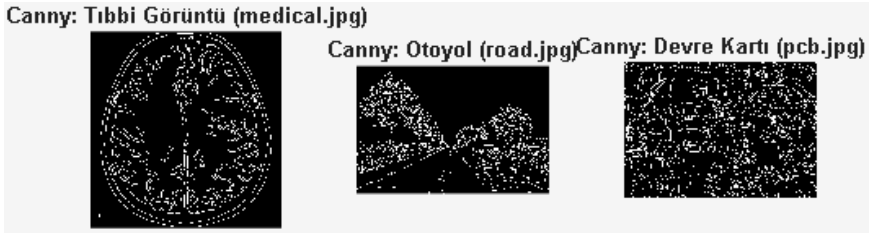
Şekil 4.3. Roberts Operatörünün 3 Farklı Görüntü Üzerindeki Sonuçları

Roberts operatörünün sonuçları, bu algoritmanın neden gürültüye en duyarlı operatör ("Bölüm 3.1.3") olarak bilindiğini açıkça ortaya koymaktadır. 2x2'lik küçük maskesi ve yumuşatma özelliğinin olmaması, onu pratik uygulamalar için en zayıf seçenek haline getirmektedir.

Tıbbi Görüntü'de: Sobel ve Prewitt'in aksine, Roberts kafatasının dış sınırı gibi güçlü kenarları bile tespit edememiştir. Çıktı, neredeyse tamamen siyahtır.

Otoyol ve Devre Kartı Görüntüleri'nde: Çıktılar, Sobel ve Prewitt'ten bile daha yoğun bir gürültü (karıncalanma) şeklindedir. Roberts, görüntüdeki en ufak bir doku veya parlaklık değişimini bile "kenar" olarak algılamış ve bu da anlamlı bir sonuç yerine tamamen gürültülü bir harita üretmiştir. Bu durum, Roberts'ın modern ve karmaşık görüntüler için uygun bir tercih olmadığını göstermektedir.

4.4. Canny Algoritması Uygulaması



Şekil 4.4. Canny Algoritmasının 3 Farklı Görüntü Üzerindeki Sonuçları

Canny algoritmasının sonuçları (Şekil 4.4), "Bölüm 3.3.1"de açıklanan dört aşamalı (Gürültü Azaltma, Gradyan, İnceltme, Hysteresis) sürecin neden "optimal" olarak kabul edildiğini kanıtlar niteliktedir. Önceki üç operatörün (Sobel, Prewitt, Roberts) tamamen başarısız olduğu yerlerde Canny olağanüstü bir performans sergilemiştir.

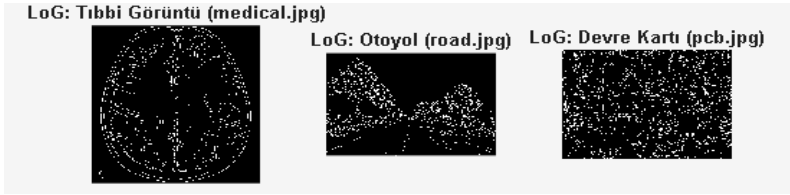
Tıbbi Görüntü'de: Sobel/Prewitt sadece dış sınırı bulurken, Canny (Gürültü Azaltma adımı sayesinde) beynin içindeki ince ve karmaşık kıvrımların (sulci) tamamını temiz bir şekilde tespit edebilmiştir.

Otoyol Görüntüsü'nde: Sobel/Prewitt'in gürültü olarak algıladığı asfalt dokusu, ağaçlar ve çimenler, Canny'nin "Hysteresis Eşikleme" adımı sayesinde

tamamen silinmiştir. Çıktı, sadece otonom sürüş için kritik öneme sahip olan yol şeritlerini ve yol kenarlarını içeren son derece temiz bir haritadır.

Devre Kartı Görüntüsü'nde: En etkileyici sonuç budur. Sobel/Roberts'ın gürültü yığını ürettiği bu görüntüde Canny, gürültüyü filtrelemiş ve "Maksimum Olmayanların Bastırılması" (NMS) adımı sayesinde devre kartı üzerindeki binlerce ince ve geometrik yolu 1 piksellik net çizgiler halinde bulmayı başarmıştır. Bu sonuçlar, Canny'nin gürültüye dayanıklılık, doğruluk ve kenar inceliği (lokalizasyon) açısından diğer tüm klasik operatörlerden açık ara üstün olduğunu göstermektedir.

4.5. LoG (Laplacian of Gaussian) Uygulaması



Şekil 4.5. LoG (Laplacian of Gaussian) Algoritmasının 3 Farklı Görüntü Üzerindeki Sonuçları

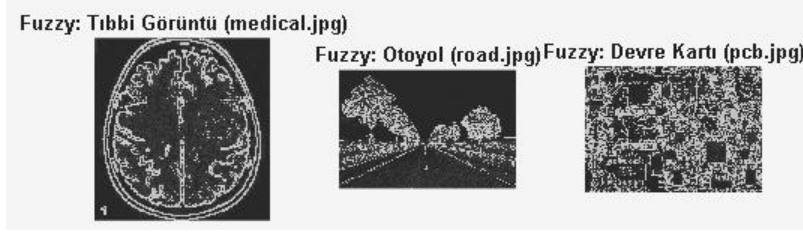
"Bölüm 3.2" de teorisi anlatılan LoG algoritması, Canny gibi bir "Gaussian yumuşatma" adımı içerdiği için Sobel/Prewitt/Roberts'tan çok daha temiz sonuçlar üretmiştir. Ancak Canny'den farklı olarak "Hysteresis Eşikleme" veya "İnceltme (NMS)" adımlarına sahip değildir; bunun yerine "Sıfır Geçişlerini" (Zero-Crossing) arar.

Tıbbi Görüntü'de: Canny'ye benzer şekilde, beynin içindeki ince kıvrımları bulmada başarılı olmuştur. LoG'un en belirgin özelliği olan "kapalı sınırlar (closed contours)" üretme eğilimi burada görülebilir.

Otoyol Görüntüsü'nde: Canny kadar temiz olmasa da, gürültüyü Sobel'e göre çok daha iyi bastırmış ve yol şeritlerini belirgin hale getirmiştir.

Devre Kartı Görüntüsü'nde: Canny'nin 1 piksellik "ince" çizgilerinin aksine, LoG'un çıktıları biraz daha "kalın" ve "bloblu" (yayılmış) olma eğilimindedir. Yine de, gürültüyü başarıyla filtrelemiş ve ana hatları bulmuştur. Genel olarak LoG, Canny'den bir adım geride olsa da, klasik gradyan operatörlerinden çok daha üstün, gürültüye dayanıklı bir yöntem olduğunu kanıtlamıştır.

4.6. Bulanık Mantık (Fuzzy Logic) Uygulaması



Şekil 4.6. Bulanık Mantık (Fuzzy Logic) Algoritmasının 3 Farklı Görüntü Üzerindeki Sonuçları

Bulanık Mantık (Fuzzy Logic) algoritmasının sonuçları (Şekil 4.6), diğer 5 algoritmadan tamamen farklıdır. "Bölüm 3.3.2"de açıklandığı gibi, bu algoritma "kesin" (0 veya 1) bir karar vermek yerine, "olasılıksal" ($[0, 1]$ arası) bir çıktı üretir. Bu, çıktının neden siyah-beyaz değil de gri tonlamalı olduğunu açıklamaktadır.

Tıbbi Görüntü'de: Bulanık Mantık'ın gücü en net bu resimde görülmektedir. Görüntü, düşük kontrastlı ve sınırlar belirsiz olmasına rağmen, Fuzzy sistemi bu belirsizlikle başa çıkabilmiştir. Diğer algoritmaların "gürültü" veya "net çizgi" olarak ürettiği çıktının aksine, Bulanık Mantık, beynin iç kıvrımlarını ve kafatası sınırını "gri tonlamalı bir olasılık haritası" olarak sunmuştur. Bu, bir uzman doktor için "burası %70 ihtimalle kenar" gibi daha anlamlı bir bilgi sağlar

Otoyol ve Devre Kartı Görüntüleri'nde: Basit Fuzzy sistemimiz, bu iki görüntüde Sobel'e benzer bir davranış göstermiş ve gürültüyü (asfalt dokusu, devre kartı detayları) filtrelemede Canny kadar başarılı olamamıştır. Bu durum, Fuzzy sisteminin gücünün, kurallarının (addRule) ve üyelik fonksiyonlarının (addMF) karmaşıklığına bağlı olduğunu; basit bir sistemin, gürültü filtreleme için tasarlanmış Canny ile bu konuda yarışamayacağını göstermektedir. Bulanık Mantık, diğerlerinin aksine edge fonksiyonu ile çağrılmaz. MATLAB'in "Fuzzy Logic Toolbox"ı kullanılarak sıfırdan bir Çıkarım Sistemi (FIS) oluşturulmasını gerektirir.

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, görüntü segmentasyonunun temeli olan altı farklı kenar belirleme algoritması (Sobel, Prewitt, Roberts, LoG, Canny, Bulanık Mantık) teorik olarak incelenmiş ve üç farklı kullanım alanını (Tıbbi Görüntüleme, Otonom Sistemler, Endüstriyel Kalite Kontrol) temsil eden görüntüler üzerinde MATLAB ortamında uygulamalı olarak test edilmiştir. "Bölüm 4: Uygulamalar ve Bulgular"da elde edilen 18 adet görsel çıktı, algoritmaların performansları arasında belirgin farklar olduğunu açıkça ortaya koymuştur. Kenar belirlemede "en iyi" tek bir algoritma olmadığını; seçimin tamamen uygulama alanına bağlı olduğunu göstermiştir. Gürültülü ortamlarda (otonomi, endüstri) ve net, ince çizgilere ihtiyaç duyulduğunda Canny rakipsizdir. Ancak belirsizliğin (fuzzy)

yüksek olduğu, kontrastın düşük olduğu (tıp) ve "olasılıksal" bir yorumun gerektiği yerlerde Bulanık Mantık çok daha güçlü bir araçtır. Sobel, Prewitt ve Roberts gibi klasik operatörler ise, hızın doğruluktan daha önemli olduğu çok basit ve gürültüsüz uygulamalar dışında modern görüntü işleme problemlerinde yetersiz kalmaktadır.

6. KAYNAKÇA

1. Canny, J. (1986). A Computational Approach to Edge Detection. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-8(6), 679-698.
2. Gao, W., Zhang, X., Yang, L., & Liu, H. (2010, July). An improved Sobel edge detection. In 2010 3rd International conference on computer science and information technology (Vol. 5, pp. 67-71). IEEE.
3. Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2018). Digital Image Processing (4th ed.). Pearson.
4. Amer, G. M. H., & Abushaala, A. M. (2015, March). Edge detection methods. In 2015 2nd World Symposium on Web Applications and Networking (WSWAN) (pp. 1-7). IEEE.
5. Bezdek, J. C., & Pal, S. K. (Eds.). (1992). Fuzzy models for pattern recognition: methods that search for structures in data. IEEE Press.
6. Meyer, F. (1994). Topographic distance and watershed lines. Signal Processing, 38(1), 113-125.
7. Kong, H., Akakin, H. C., & Sarma, S. E. (2013). A generalized Laplacian of Gaussian filter for blob detection and its applications. IEEE transactions on cybernetics, 43(6), 1719- 1733.
8. Cherri, A. K., & Karim, M. A. (1989). Optical symbolic substitution: edge detection using Prewitt, Sobel, and Roberts operators. Applied optics, 28(21), 4644-464

BÖLÜM 19

Elektrikli Araçlarda Kullanılan Yeşil Kompozitler

Ahmet Özgür Ağırgan¹ & Mehtap Ağırgan²

¹ Öğr. Gör. Dr., Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği. ORCID: 0000-0003-2412-5265

² Dr. Öğretim Üyesi, Kırklareli Üniversitesi Lüleburgaz MYO
ORCID: 0000-0002-1381-8624

1. GİRİŞ

Çeşitli faz ve miktarlarda birden fazla malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşan çok fazlı ve üstün performanslı kombinasyonlar Kompozit malzeme olarak tanımlanmaktadır. İlk kompozit malzemenin kullanımı M.Ö. 3000’li yıllarda Mezopotamya’da killi çamur ve samandan yapılan, inşaatta kullanılan kerpiç tuğla olarak insanlık tarihine girmiştir. M.Ö 2500’lerde Mısırdaki mumyalama işleminde doğal kauçuk ve keten kullanılarak ilk filament sarma prosesi uygulanmıştır. Kompozit malzemeler; matris ve takviye adı verilen iki farklı elemanın bir araya getirilmesi ile oluşan yüksek performanslı malzemelerdir. Biyo polimerler doğal polimerik yapıdaki malzemeleri kimyasal polimerizasyon ve/veya biyolojik olan yüksek molekül ağırlıklı malzemeleri de içermektedir. Bu nedenle sürdürülebilir kaynaklardan elde edilen poliamidler, polithioesterler, polisakkaritler, polioksioesterler, polyanhidritler, polifenoller gibi polimerler, biyo polimerler olarak isimlendirilmektedir. Polilaktik asit (PLA) ve selüloz ester türevleri buna örnektir. Yeşil kompozitler, petrol ve türevlerinden elde edilen polimerlerin çevresel etki ve sürdürülebilirlik sorunları nedeni ile genellikle tarımsal bitki ve atıklar gibi doğal kaynaklardan elde edilen lif ve/veya polimerlerden geliştirilen makro, mikro veya nano büyüklükteki biyolojik olarak bozunabilen yapıdaki matris ve takviye elemanlarından oluşan kompozit malzemelerdir (Ağırgan ve Taşkın, 2023). Yeşil kompozit malzemeler otomotiv, inşaat, ambalaj ve mobilya sektörleri başta olmak üzere birçok endüstriyel alanda kullanılmaktadır.

Son yıllarda, Polietilen ve Poliester gibi geleneksel polimerlerin biyobozunur matris yapısında ticari ürünleri geliştirilmiş olsa da yüksek maliyetleri en büyük dezavantajdır. Maliyetin yanı sıra, daha düşük mukavemet ve sertlik, bu reçinelerin yapısal bileşenler için uygunsuz hale getirmektedir. Şu anda çevre dostu kompozitlere doğru en uygun yol, takviye olarak biyo-liflerin kullanılmasıdır.

Literatürde, Avrupa’da kompozit takviye olarak kullanılan liflerin yaklaşık %90’ının cam elyafı ve sadece %3’ünün biyo-elyaf olduğunu ortaya koymuştur. Otomotiv kompozit parçalarında sentetik liflerin biyo-elyaf ile değiştirilmesinin, malzeme ağırlığını %30 ve maliyetini %20 oranında azaltacağı tahmin edilmektedir. Kuzey Amerika’da üretilen her bir arabada sadece 3,5 kg cam elyafının biyo-elyaf ile değiştirilmesinin, sera gazı emisyonlarını yılda en az 500 milyon ton azaltacağı bildirilmektedir (Witten ve Kraus, 2014). Bu bağlamda 2000/53/EC sayılı Avrupa Birliği Direktifi, 2015 yılına kadar üye ülkelerin, bir aracın ömrü dolduktan sonra üretiminde kullanılan malzemelerin en az %95’ini geri kazanmasını ve üretiminde tekrar kullanılmasını zorunlu hale getirmeyi hedeflemektedir. Ayrıca geri kazanılan lifler sadece otomotiv endüstrisinde değil,

bina ve inşaat gibi çeşitli diğer kompozit sektörlerine uygulanmasının çeşitlendirilmesini düşünmektedir (Gassan ve Bledzki, 1999).

Biyo-lif takviyeli kompozitlerin cam elyaf kompozitlerin yerini alması için proses ve ekipman geliştirmek ve yeni kompozit ürünlerini elektrikli araçlarda kullanabilmek için multidisipliner mühendislik çalışmaları hızla devam etmektedir. Yapılan araştırmaların çoğu, kısa elyaflarla güçlendirilmiş kompozitlerin mekanik özellikleriyle ilgili çalışmalara dayanmaktadır. Elde edilen bileşenler çoğunlukla elektrikli araçlar için kapaklar, kapı panelleri ve araba çatıları gibi kaporta parçaları üretmek için kullanılmaktadır (Bledzki, Faruk, ve Sperber, 2006; Charlet, 2012; Faruk, Bledzki, Fink, ve Sain, 2014.)

Malzeme seçiminde, sentetik liflerin yerine doğal liflerin kullanılması ekolojik üretimin sadece ilk adımıdır. CO₂ gibi gazların atmosfere neden olduğu emisyonunun kısıtlanması ve fosil enerji kaynaklarının tükenme riskinin olması, gibi faktörler tamamen yenilenebilir kaynaklardan üretilen malzemelerin geliştirilmesine yol açmaktadır. Göreceli fiyat ve kalite elektrikli otomobillerin gereksinimlerini yerine getirdikten sonra, bu ürünlerin teknik özellikleri yerine getirip getirmediğini kontrol etmek gerekmektedir (Rajpurohit and Henning, 2017).

Bitkisel liflerle takviye edilmiş polimer kompozit malzemelerin (yeşil kompozitler) tanımlanan en büyük problemi, doğal liflerin hidrofilik karakteri ile termoplastik matrisler arasındaki uyumsuzluktur, bu da istenmeyen özelliklere yol açar. Bu nedenle, fiber ve matris arasındaki yapışmayı iyileştirmek için çeşitli ara yüz modifikasyonları ile bu sorun çözülmeye çalışılmaktadır.

Yeşil kompozitler için en kritik uygulama alanları; yapı (zemin kaplama ve siding) ve otomotiv iç kısımlarıdır. Toplam Avrupa kompozit pazarının %10 ila % 15'i ahşap plastik kompozitler (WPC) ve doğal lif kompozitleri (NFC) oluşturmaktadır (Carus, Elder, Dammer, Korte, Scholz, Essel, Breitmayer, Barth, 2015).

Elektrikli araçlar, geleneksel petrol türevi yakıtlarla içten yanmalı pistonlu motorla tahrikli hareket sistemleri yerine, yakıt olarak batarya da depolanmış elektrik enerjisi ile bir veya daha fazla sayıda elektrik motoru kullanan taşıtlardır. Elektrikli araçların çalışma mekanizması, motordaki rotorların hareketi ile başlar. Rotorun dönmesiyle birlikte elektrik akımı üretilir ve bu akım, motor tarafından hareket enerjisine dönüştürülür. Böylece ortaya çıkan kinetik enerji, aracın hareket etmesini sağlar. Elektrik enerjisi, doğru akım olarak bataryalara depolanır ve ardından kontrol ünitesi aracılığıyla motora iletilir. Aracın temel bileşenleri arasında batarya, kontrol ünitesi ve elektrik motoru yer alır. Kontrol ünitesi, aracın ihtiyacı kadar elektrik enerjisini motora gönderir. Geleneksel araçlara göre

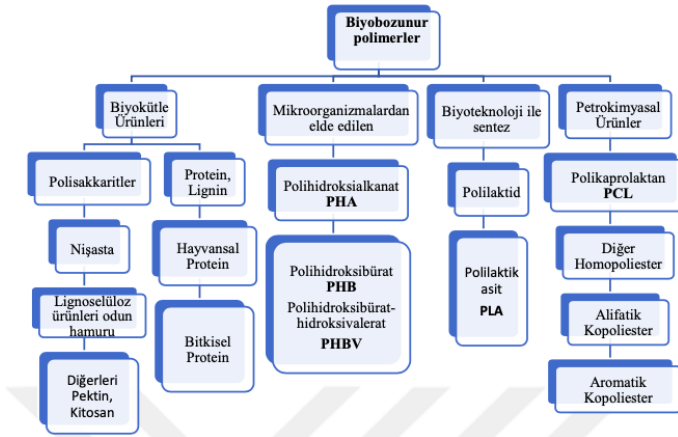
elektrikli araçların, karbon emisyonlarını azaltmak, hava kirliliğini önlemek, doğal kaynakları korumak ve sürdürülebilir enerji kullanımını teşvik etmek, gibi önemli avantajları vardır. Batarya sistemleri gün geçtikçe gelişmekte olsa da kısıtlı menzil süreleri elektrikli otomobillerin en büyük sorunlarının başında gelmektedir. Bu soruna günümüzde lityum iyon teknolojisine alternatif batarya sistemleri geliştirilmekte olsa da, şimdilik en verimli çözüm taşıt ağırlığının azaltılması olarak göze çarpmaktadır. Araç ağırlığının azaltılması için, kolay deforme olmayan hafif, dayanıklı ve ekolojik etkiyi bozmayan yapıları nedeniyle biyo lif takviyeli ve matrisli Yeşil Kompozitlerin kullanılması önemli bir çözüm sunmaktadır.

Bu çalışma, otomotiv sektöründe giderek artan pazar payı oluşturan elektrikli araçlarda yakıt verimine ve dolayısıyla kısıtlı menzil probleminde ciddi anlamda etkisi olan yeşil kompozit malzemelerin kullanım yerlerini, teknolojik gelişim beklentilerini ve ekonomik maliyetleri açısından detaylı bilgi vermek amacı ile hazırlanmıştır.

2- KOMPOZİTLER İÇİN BİYOLİF MALZEMELERİ

2.1. Biyo Polimer ve Lif Malzemeleri

Biyo polimerler doğal polimerik yapıdaki malzemeleri kimyasal polimerizasyon ve/veya biyolojik olan yüksek molekül ağırlıklı malzemeleri de içermektedir. Bu nedenle sürdürülebilir kaynaklardan elde edilen poliamidler, polithioesterler, polisakkaritler, polioksoesterler, polyanhidritler, polifenoller gibi polimerler, biyo polimerler olarak isimlendirilmektedir. Polilaktik asit (PLA) ve selüloz ester türevleri buna örnektir. Şekil 1’de Biyo polimerlerin sınıflandırılması verilmiştir.

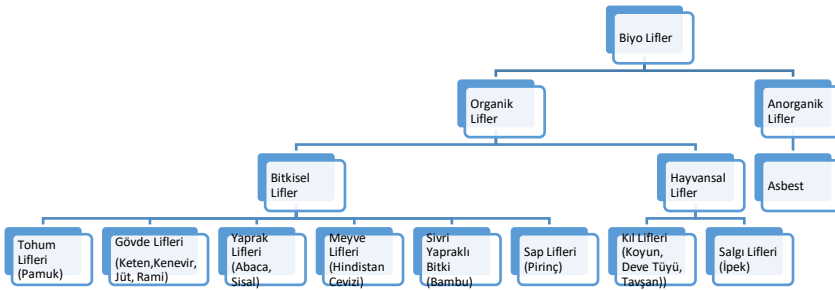


Şekil 1. Biyo Polimerlerin Kaynaklarına göre Sınıflandırılması (Ağırhan, 2020).

Biyo lifler, kaynağına bağlı olarak üç gruba ayrılır. Bunlar bitki, hayvan ve minerallerden elde edilen liflerdir. Biyo-lif kompozit (Yeşil Kompozit) uygulamalar için en yaygın kullanılan kategori bitkisel kaynaklardır. Bunlar arasında en belirgin olanı, keten, kenevir, jüt, rami vb. içeren bast lifleridir. Bu lifler, diğerlerine göre geniş kullanılabilirlikleri ve kısa sürede yenilenebilirlikleri nedeniyle en belirgin şekilde kullanılan bitkisel lifler olarak kabul edilir. Diğer önemli kaynaklar arasında tohum lifleri (örneğin pamuk), yaprak lifleri (abaka ve sisal), meyve lifleri (hindistan cevizi lifi) ve sap lifleri (bambu) bulunur. Hayvansal lif ve mineral lif sınıflandırmasına giren birkaç çeşit lif vardır, bu gruptan en değerli olanlar koyun kılı, ipek, asbest vb.dir. Bu lifler kompozit alanında fazla kullanılmaz. Bitkiye sağlamlık ve sertlik kazandıran şeyin bast veya kabuk olduğu bilindiğinden, benzer kompozit uygulamaları için bitkilerin bastlarından çıkan lifleri kullanmayı denemek mantıklıdır. Şekil 2'de, jüt, keten, kenaf, kenevir ve sisal gibi biyo-liflerin mekanik özelliklerine genel bir bakış ve termoset kompozit uygulaması için ilgili yeni nesil biyo lifler verilmiştir (John, Thomas, 1999).

Lif	Yoğunluk (g cm ⁻³)	Çap (µm)	Çekme Dayanımı (MPa)	Özellik Güç (S/ρ)	Çekme Modülü (GPa)	Spesifik Modül (E/ρ)	Kopma Uzaması (%)
Abaka	1.5	—	400	267	12	8	3–10
Bambu	1.1	240–330	500	454	35.91	32.6	1.4
Muz	1.35	50–250	600	444	17.85	13.2	3.36
—	1.2	—	175	146	4–6	3.3–5	30
Keten	1.5	—	800–1500	535–1000	27.5–80	18.4–53	1.2–3.2
Kenevir	1.48	—	550–900	372–608	70	47.3	2–4
Jüt	1.46	40–350	393–800	269–548	10–30	6.85–20.6	1.5–1.8
Kenaf	1.45	70–250	930	641	53	36.55	1.6
Ramık	1.5	50	220–938	147–625	44–128	19.3–85	2–3.8
Sisal	1.45	50–300	530–640	366–447	9.4–22	6.5–15.2	3–7

Biyo liflerin Mekanik Özellikleri



Şekil 2. Biyo Liflerin Sınıflandırılması ve Mekanik Özellikleri

Bitki saplarından biyoliflerin çıkarılması için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Çürütme, bitki materyallerinden biyoliflerin çıkarılması için başlangıç işlemidir; bu işlemde, lifin odunsu hücrelerden ayrılmasına sağlamak ve liflerin bitki saplarından sonraki adımlarda çıkarılmasını daha da kolaylaştırmak için bitki sapının kontrollü bir şekilde parçalanmasıdır. Belirli bir süre, neme maruz bırakma ve bazen gövdenin bir kırma makinesi tarafından

mekanik olarak işlenmesi çürütme işlemini tamamlamaktadır. Çürütme işlemi genel olarak biyolojik, kimyasal, fiziksel ve mekanik olmak üzere dört farklı işleme ayrılabilir. Biyolojik çürütme, adından da anlaşılacağı gibi, lifleri biyolojik yollarla parçalayarak ayırmaktır. Bu biyolojik yollar yapay veya doğal olarak ikiye ayrılır. Mekanik çürütme, daha basit ve ekonomik bir çürütme işlemidir, ancak karşılaştırmalı olarak daha düşük kalitede ve kaba lifler üretilir (Charlet, 2012; Yan, Chouw, and Jayaraman, 2014; Mohanty, and Misra, 1995).

Fiziksel çürütme işlemi, buhar sıcaklığı ve basıncı nedeniyle artan enzimatik aktiviteler tarafından retting işleminin başlatıldığı ultrasonik çürütme ve buhar patlaması çürütmeyi içermektedir. Kimyasal çürütme işlemi, bitki materyalinin pektin bileşenini çözmek için sülfürik asit, klorlu kireç, sodyum veya potasyum hidroksit ve soda külü içeren çözeltilerin kullanımını içermektedir. Kimyasal çürütme işlemi ile yüksek kaliteli lifler üretilir ancak son ürünün maliyetini arttırır. Enzimatik veya mikrobiyal yollarla çürütme, jüt, kenevir ve keten gibi bitkilerden kaliteli selüloz lifleri elde etmek için en çok kullanılan tekniklerden biridir (Sain and Panthapulakkal, 2006).

2.2. Biyo Liflerin Avantaj ve Dezavantajları

Biyo liflerin en önemli avantajı, elyaf türüne ve coğrafi ve iklim koşullarına bağlı olarak dünya çapında bulunabilir olmasıdır. Avrupa'da kenevir ve keten elyafı; Güney Amerika'da sisal, abaka ve rami ve Kuzey Amerika pamuk, kenevir ve keten üretilirken Asya kıtası bambu, kenaf, rami, keten, bamya ve ağırlıklı olarak hindistan cevizi lifi, jüt gibi çeşitli lifler için en büyük üretim alanlarına ev sahipliği yapmaktadır. Ayrıca, biyo-lifler kompozit uygulamaları için cam gibi geleneksel liflere göre üstün özellikleri sahiptir. Bu lifler, geleneksel takviye yapım ekipmanlarında ve süreçlerinde kullanılabildikleri için işlenmesi kolaydır. Bu lifler, solunduğunda veya temas edildiğinde herhangi bir alerjiye veya akciğer hastalığına neden olmadıkları için daha güvenlidir. Biyoliflerden elde edilen kompozitler, ekstruder, peletleyici veya enjeksiyon kalıplama makineleri gibi işleme makinelerinde üretilmektedir. Çok fazla aşınmaya neden olmamaları ve ayrıca keskin kenar kırıkları göstermedikleri için çarpışma performansında çalışma sırasında daha güvenli olmaları bakımından da bir avantaja sahiptir. Biyolifler, elyaftaki lümen/boşluk varlığı nedeniyle özellikle otomotiv iç mekanı veya inşaat malzemesi olarak daha iyi termal ve akustik yalıtım özellikleri sağlar. Cam elyaf takviyeli kompozitlere kıyasla hafiftirler, böylece iç mekanda ve araç döşeme panellerinde daha iyi yakıt verimliliği veya ağırlık tasarrufu sağlarlar. Biyo-liflerin çevresel performanstaki üstünlüğü, üretim için daha düşük enerji gereksinimleri, daha düşük ağırlıktan kaynaklanan daha düşük emisyonlar ve biyo-liflerin kullanım ömrü sonunda yakılmasından elde edilen enerji ve karbon

emülsiyonları, yeşil kompozit uygulamalarda biyo-liflere olan geniş ilginin ana itici gücüdür (Charlet, 2012; Mohanty and Misra,1995).

Ancak biyo lifler, yeşil kompozit alanında teknik uygulamalarda kullanılabilmesi için çeşitli dezavantajlara da sahiptir. Bunların en önemlisi, liflerin kendisinin ve bu hammaddelerden üretilen takviye formlarının kalite tutarsızlığıdır. Toprak, nem, güneş ışığı, rüzgar, çürütme ve uzaklaştırma işlemi vb. gibi çok sayıda faktör, üretilen biyoliflerin olgunluğunu ve kalitesini etkiler. Bu faktörler (bazıları kontrol edilemezken diğerleri kontrol edilebilse bile) küresel parametreler dikkate alındığında lif kalitesinde büyük farklılıklar yaratmaktadır (Mohanty and Misra,1995).

Kompozit üreticileri yeniden üretilebilir mekanik özellikler beklediklerinden, etkili bir kalite seviyesini sağlamanın tek yolu, lif özelliklerinde büyük güvenlik katsayıları almaktır; bu da çekiciliğini azaltır ve avantajlarından tam olarak yararlanılmasını engeller (Sain and Panthapulakkal, 2006). Biyoliflerin doğası gereği ortaya koyduğu diğer zorluklar, lif yüzeyinde bulunan hidroksil grupları ve biyoliflerin lif hacim oranlarının yaklaşık %60'ını oluşturan hücre duvarının kristal olmayan bölgeleridir. Selüloz ve hemiselüloz, hidrofilik olan ve nem çekmesinden sorumlu olan ve ayrıca lifin ve kompozitlerin boyut kararlılığını etkileyen üç ana bileşenden ikisidir (diğeri lignindir). Havadaki nem kompozit tarafından emilir, bu da lif matris bağının gevşemesine ve kompozit yapının daha da zayıflamasına neden olur. Biyoliflerin sıcaklık bağımlılıkları ve mekanik özelliklere katkıları hem termoset hem de termoplastik matrislere sahip biyolif kompozitlerinin de bilinen bir dezavantajıdır. Çalışmalar, tipik bir biyolifin termal kararlılığının, bozunma sürecinin başladığı 200°C kadar düşük bir sınıra sahip olduğunu bildirmiştir (Joshi, Drzal, Mohanty, and Arora, 2004; Sahari, and Sapuan, 2011).

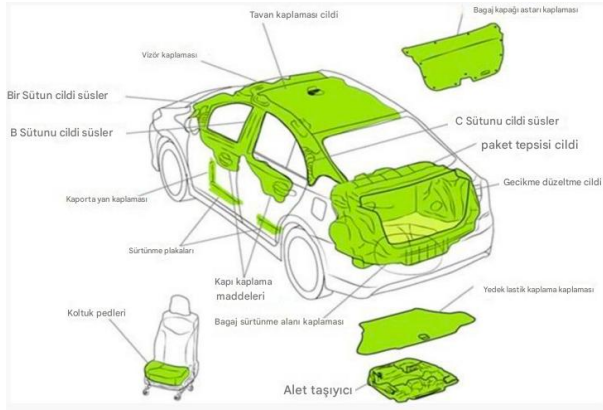
3. YEŞİL KOMPOZİT MALZEMELERİN KULLANIM YERLERİ

Henry Ford, 1942 de kenevir liflerinden yapılmış ilk prototip kompozit arabayı geliştirdi (Mohanty and Misra, 2005). Araba, ekonomik nedenler yüzünden seri üretime geçemedi. Araba, çelik bir arabadan 1000 lbs. daha hafifti. Gövdesi çoğunlukla soya reçinesi takviyeli kenevir, sisal ve buğday samanı kompozitlerinden oluşmaktaydı ve ağırlığı, kenevir yağı yakıtıyla çalışan normal bir arabanın üçte ikisi kadardı. O dönemde bol miktarda bulunan petrol ve otomotiv endüstrisinin aniden İkinci Dünya Savaşı'na sürüklenmesi, bu araştırmanın ilerlemesini etkileyen yüksek mekanize araçlara olan ihtiyacı beraberinde getirdi. 1957 yılı, otomobiller de yeşil kompozitler için büyük bir atılımın gerçekleştiği yıl olmuştur. Doğu Almanlar, çatısı, bagaj kapağı, kaputu, çamurlukları ve kapıları pamukla güçlendirilmiş termoset fenolik reçineden

yapılmış monokok bir yapıya sahip bir Trabant otomobili ürettiler (Akampumuza, Wambua, Ahmed, Li, Qin., 2016).

1982'de FIAT, punto'sunda ahşap zemin dolgulu kapı panellerini tanıttı (Mann, Van den Bos, and Way, 1999). Doğal liflerin ve yeşil kompozitlerin otomobillerde pratik kullanımı, endüstrinin gelişmesinin arkasındaki en büyük güç olan fosil yakıtların tükenme oranının daha belirgin hale gelmeye başladığı yirminci yüzyılın sonlarında olmuştur. Bu, endüstrinin çevreye yönelik sürekli tehdidiyle birlikte, paydaşları araç montajında daha yakıt tasarruflu, çevre dostu, daha hafif ve yenilenebilir malzemelerin yaygın olarak uygulanmasını düşünmeye sevk etti (Park, Dang, Roderburg, and Nau, 2013). Bu nedenle, 1991'den beri Daimler Benz, bazı otomobil parçalarında cam elyaf takviyelerini doğal liflerle değiştirmek için yoğun bir araştırma yürütmektedir. Daimler-Benz'in Sao Paulo Brezilya'daki bir yan kuruluşu, ticari araç parçalarında hindistan cevizi liflerinin kullanıldığı "Beleem projesini" üstlendi (John and Thomas, 2008).

Otomotivde biyo kompozitlerin ticarileştirilmesine yönelik atılan ilk adım oldukça temkinliydi ve yeniliklerin çoğu yapısal olmayan iç bileşenlere odaklanmıştı; ahşap kaplamalar, koltuk dolguları, koltuk arkalıkları, tavan döşemeleri, gösterge panelleri ve bu parçalardaki kusurlar için termo akustik yalıtımlar o kadar da kötü değildi (Summerscales, Dissanayake, Virk, and Hall 2010; Koronis, Silva, and Fontul, 2013). Ancak, bu alandaki sürekli araştırma ve geliştirmelerle birlikte, kapsam koltuk çerçeveleri, yük tabanları, kamyonet kasaları, taban sacları, aktarma organları ve direksiyon bileşenleri gibi daha yapısal parçalara doğru ilerlemektedir. Çalışmalar, doğal elyaf takviyeli kompozitlerin yüksek mukavemet, yüksek sertlik ve düşük bileşen ağırlığının gerekli olduğu yerlerde uygulanabileceğini göstermiştir (Dwivedi, Hashmi, Naik, Joshi, and Chand, 2013).



Şekil 3. Çeşitli otomobil bileşenlerinde biyopolimerlerin kullanımı
<https://actgroup.ir/biopolymers-used-in-automobile-industry> (3.10.2025 erişim tarihi)

Gövde liflerinden elde edilen doğal lifler baş, bagaj bölgelerinde ve koltuk arkalıkları gibi yerlerde kullanılmaktadır. Avrupa’da geri dönüşüm ve sürdürülebilirliği sağlamak için, doğal lifler artık motor sporlarında gövde panelleri ve çarpışma yapılarında kullanılmaya başlanmıştır. Örneğin, Porsche Motorsport, Eylül 2020’de tamamı doğal elyaf takviyeli kompozit gövdeye sahip Cayman 718 GT4 CS MR spor arabanın tanıtımını yaptı. 2019’da doğal lif takviyeli kapılar ve arka kanat ile piyasaya sürülen Porsche Cayman 718 GT4 CS modeli, motor sporları için seri üretimde karbon lifini doğal elyaf ile değiştiren ilk otomobil olmuştur (Şekil 4.)

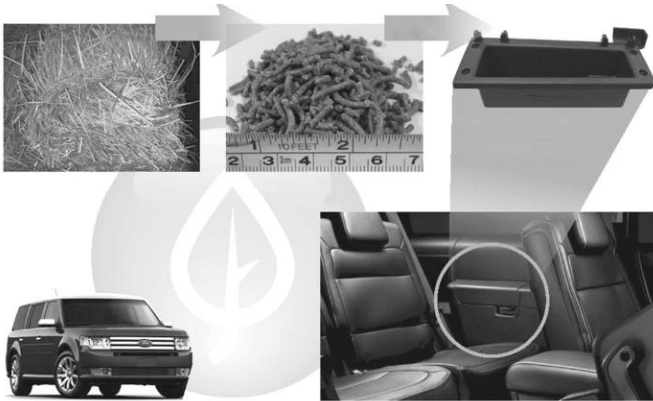


Şekil 4. Doğal elyaf kompozit gövdeye sahip Porsche Cayman 718 GT4 CS MR modeli
<https://www.compositesworld.com> erişim: 22.08.2023).

Kuzey Amerika'daki Ford Otomotiv Şirketi, Amerika Birleşik Devletleri, Aachen, Almanya ve Brezilya'daki Ar-Ge merkezleri, ağırlık ve karbon ayak izini azaltmanın bir yolu olarak yenilenebilir kaynaklardan otomotiv köpükleri ve yeşil

kompozitleri geliştirmektedir. Bu alışma; çiftçiler, araştırmacılar, reçine üreticileri, ekipman üreticileri, kimya şirketleri ve niversiteler de dahil olmak üzere bir dizi paydaşın katılımıyla ortak bir çabayla gerçekleştirildi. Soya köpüklerini geleneksel petrol bazlı köpüklerle karşılaştıran yaşam döngüsü analizleri, kullanılan her pound soya yağı için net 5,5 pound karbondioksit azaltımı göstermektedir (John. and Thomas, 2008). Bu nedenle yeşil kompozitleri benimsemek, petrole olan bağımlılığın azaltılması ve yenilenebilir tarım kaynaklarının kullanımının artırılması yönünde büyük bir adım olmaktadır. Ford'un şu anda yollardaki 8 milyondan fazla aracında soya köpüğü koltuklar bulunuyor ve bunun, geleneksel malzemelerin kullanıldığı zamana kıyasla yıllık petrol kullanımını 5 milyon pounddan fazla azalttığı düşünülmektedir.

2008 yılında Ford Motor Company, Ford Mustang için soya bazlı koltuk köpüğü geliştirmek üzere Lear Corporation ile ortaklık kurdu ve biyo-bazlı yastıklar 2010 yılında bir milyondan fazla Ford Lincoln ve Mercury aracına tanıtıldı. Expedition, F-150, Focus, Escape, Mercury Mariner, Lincoln Navigator ve Lincoln MKS (Andresen, Demuth, Lange, Stoick, and Pruszko, 2012) dahil olmak üzere bir dizi başka Ford markasıyla da benzer çalışmalar yapıldı. Buğday samanları üzerinde yapılan testler de iyi mekanik özellikler ve zaman testine dayanma kabiliyeti ortaya koyarak 2010 Ford flex crossover enjeksiyon kalıplı saklama kutularında kullanılmalarına neden oldu. Ford Montagetrağer'ın (Holbery and Houston,2006) n ızgarasında kenevir-propilen kompozitleri oluşturulurken yakıt deposu tüplerinde %100 hint yağı türevi naylon-11 kullanılarak yılda 1 milyon pounda yakın karbondioksit emisyonu azaltımı sağılandı (şekil 5).



şekil 5. Ford esnek amurluk kaplama paneli, saklama bölmesi ve kapak hattı tertibatında doğal elyaf kullanımına dair bir örnek (%20 buğday samanı takviyeli PP). (Akampumuza, Wambua, Ahmed, Li, Qin, 2016)

Otomotiv biyo kompozitlerinin modern çağında, Mercedes Benz'in ilk yeniliği, 1994 E-Serisi modelinin iç kapı panelleri için jüt takviyeli plastiklerin kullanılmasını içeriyordu (Şekil 6) (La Mantia and Morreale, 2011). Kapı, yaklaşık %20'lik bir ağırlık azaltımı sağlayan keten/sisal elyaf keçe takviyeli epoksi matrisinden yapılmıştı. 2000 yılında Mercedes, EvoBus, Travego ve Setra Top-class gibi bir dizi otobüs markasının motor kapsüllerinde polyester/keten takviyeli kompozitler kullanmaya başladı. Setra serisi motorda doğal elyaf takviyeli UP reçinesi kullanılarak %5'lik bir ağırlık azaltımı sağlandı (Koronis, Silva, and Fontul, 2013). 2006 Mercedes Benz S-Serisi'nin montajında toplam 27 adet doğal elyaf bazlı iç parça kullanıldı; Ön kapı döşemelerinin iç kısmında, sürücü koltuğu sırt dayanağında ve enjeksiyon kalıplı tutma kancasında ahşap lifleri, paket raflarında ve arka bagaj kapaklarında keten lifleri, döşeme şeritleri ve panellerde ahşap kaplama kullanılmıştır. Yenilenebilir malzemelerin kullanımındaki bu %73'lük artış, önceki modele kıyasla aracın toplam ağırlığına yaklaşık 43 kg katkıda bulunmuştur (Finkbeiner and Hoffmann, 2006).



Şekil 6. Keten, kenevir, sisal ve yün içeren Mercedes Benz E sınıfı parçalar. (Akampumuza, Wambua, Ahmed, Li, Qin, 2016)

Güney Afrika'da üretilen Mercedes-Benz C-Serisi modellerinin arka panel rafları sisal takviyeli kompozitlerden yapılmıştır. Almanya'nın Ulm kentindeki Daimler-Chrysler Araştırma Merkezi'nde üretim teknolojisi direktörü olan Profesör Heinrich Flegel'e göre, doğal liflerin kullanımı ağırlığı %10, bu ünitelerin üretimi için gereken enerjiyi ise %80 oranında azaltmış ve bileşen maliyetini, benzer fiberglas takviyeli bileşenlere göre %5 daha düşük hale getirmiştir (Mohanty, Misra, and Drzal, 2002). Liflerin işlenmesi ve bileşenlerin üretimi de dahil olmak üzere bu markanın üretimi, sisal çiftçilerinin katılımını sağlamak ve onları finansal olarak güçlendirmek amacıyla Güney Afrika'daki Daimler Chrysler'e devredilmiştir (Saxena, Pappu, Haque, and Sharma, 2011). 2002 yılında, Daimler-Chrysler araştırmacıları, 2004 A-Serisi coupe stepne jant kapaklarında camın yerini almak üzere Philippine Manila Cordage Company'den

tedarik edilen PP takviyeli abaka elyaflarından oluşan yeni bir karışımın patentini aldılar ve bu karışım Mercedes-Benz'e 2005 Plastik Mühendisleri Derneği (SPE) tarafından "çevre kategorisinde" yenilikçilik ödülü kazandı (Koronis, Silva, and Fontul. 2013; Sinon, Kohler, Cotter, and Meuller, 2011). Biyo poliamidden bir hava filtresi sisteminin başarılı bir şekilde üretilmesinin takdiri olarak, Daimler, BASF ve Braunschweig Üniversitesi, plastiklerin yenilikçi uygulaması için 2009 VDI ödülünü aldı. Poliamid 6.10, %6 ağırlık tasarrufu, %10 cam elyafı ve %20 mineral maddelerle takviye edilmiş ağırlıkça %60 hint yağı türevi sebasinik asit olan heksametilendiamin'den üretildi, bu da geleneksel fosil bazlı poliamide kıyasla %6 ağırlık tasarrufu, daha iyi boyutsal kararlılık, daha düşük su emilimi ve geliştirilmiş akış özellikleri sağladı (Şekil 7).



Şekil 7. Mercedes Benz S-Serisi kapı paneli.
(Orijinal resme wileyonlinelibrary.com adresinden ulaşabilirsiniz.)

Toyota'nın yeşile doğru ilk ticari çabası, RAUM 2003 model stepne kılıfında Kenaf lifleriyle güçlendirilmiş tatlı patates ve şeker kamışından elde edilen PLA matrisinin kullanılmasını içeriyordu. Daha sonra Endonezya'da Mazda kapı döşemeleri ve diğer iç parçaları üretmek için Kenaf lifiyle güçlendirilmiş PP kompozitleri kullandı. 2008 Rav-4 modellerinde soya bazlı koltuk köpükleri kullanılırken, biyo-bazlı PP/PLA, Lexus CT200h'nin yan döşemelerinde, kapı koruma plakalarında, alet kutusu alanında, zemin kaplama plakasında uygulama alanı buldu. 2009'da Toyota, biyo-bazlı kompozit çağındaki belki de en zorlu yeniliklerden biri üzerinde çalıştı ve 2010 Toyota Camry Sedan radyatör uç deposu için Zytel RS biyo-bazlı naylon kullanımını içermekte idi. Sistem tedarikçisi, kalıpcı DENSO Corp. (Kariya, Aichi, Japonya) ve reçine tedarikçisi DuPont Automotive (Troy, MI) tarafından ortaklaşa geliştirilen parçalar, %40 oranında hint yağı bitkisinden elde edilen biyo bazlı monomerlerle formüle edilmiş %30 kısa cam elyaf takviyeli poliamid (PA 6,10 veya naylon 6,10) reçine karışımından enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretilmiştir. Bu yöntem, biyokompozitlerin yüksek darbe dayanımı, kimyasal direnç, sürünme direnci ve geniş bir sıcaklık ve basınç aralığına maruz kalmanın getirdiği uzun vadeli ısı

yaşlanma performansı gerektiren zorlu uygulamalardaki yetersizliğini açıklığa kavuşturmuştur (Zimniewska, Wladyka-Przybylak and Mankowski, 2011). Şirket, 2011 yılında otomotiv endüstrisinde biyo bazlı polietilen tereftalat (PET) reçinesinin kullanımına öncülük etmiştir. Bu yeni malzemenin, Lexus-CT200 bagaj bölmesi kaplamasında kullanılan mısır bazlı parçalara kıyasla daha iyi ısı direncine, daha fazla dayanıklılığa ve daha az büzülme duyarlılığına sahip olduğu bildirildi.

https://www.toyota.com/content/dam/tusa/environmentreport/downloads/2024N AER_Final_Feb25.pdf

Volkswagen, merkezi Almanya'nın Wolfsburg kentinde bulunan, dünyanın altıncı büyük otomobil üreticisidir (<https://www.ekonomim.com/kuresel-ekonomi/en-cok-otomobil-ureten-30-ulke-belli-oldu-turkiye-kacinci-sirada-haberi-789367>). Şirket, Audi, Bentley Motors, Bugatti Automobiles ve Lamborghini gibi birçok araç markasının bağlı ortaklıkları arasında yer almaktadır. Ar-Ge yatırımları açısından lider otomobil üreticisidir. Golf A4 ve Golf A4 varyantı 1998 modellerinde kapı ekleri, koltuk arkalıkları, arka kapak astarı ve paket tepsileri için doğal elyaf takviyeli kompozitler kullanılmıştır. Audi, 2000 yılında kapı döşeme panellerinin keten/sisal hibrit paspaslarla güçlendirilmiş poliüretandan yapıldığı A2 orta sınıf otomobilini piyasaya sürmüştür (Beckermann, 2007).

Genellikle GM olarak bilinen General Motors, Michigan'da merkezlenmiş olup, bağlı kuruluşları aracılığıyla araç ve araç parçaları üretmekte, pazarlamakta ve dağıtmaktadır. Chevrolet, Buick, GMC, Cadillac, Baojun, Holden, Isuzu, Jie Fang, Opel, Vauxhall ve Wuling olmak üzere 11 marka altında 37 ülkede üretim birimleri bulunmaktadır. Cadillac DeVille'in koltuk arkalıklarında ve GMC Envoy ve Chevrolet Trailblazer'ın bagaj bölmesi zemininde odun lifleri kullanılmaktadır (Kim, Lee, Chung, Kwon, Cho, and. Tze, 2013). 1995 Opel Corsa'nın iç kapı panelleri keten elyaf takviyeli PP kompozitler kullanılarak üretilmiştir. Michigan'daki Cambridge Industry, Freightliner Century COE C-2 ağır kamyonlar için keten elyaf takviyeli PP ve 2000 model Chevrolet Impala için arka raf döşeme panelleri üretmektedir (Shinoj, Visvanathan, Panigrahi, and Kochubabu, 2011).

Bavyera Motor Fabrikaları—BMW AG, Alman otomobil, motosiklet ve motor üreticisi, BMW3, 5 ve 7 serileri de dahil olmak üzere 1990'ların başından beri doğal lifler kullanılmaktadır. BMW7 serisinin her birinde iç kapı kaplamalarında ve panellerinde 24 kg yenilenebilir malzeme kullanılmıştır; koltuk arkalıklarının arka taraflarını kaplamak için ahşap lifleri ve ses yalıtımı için pamuk lifleri kullanılmıştır (Huda, Ray, Mohanty, and Misra, 2008). Dräxlmaier Group, modifiye edilmiş poliakrilik asit, BASF'den ticari markalı

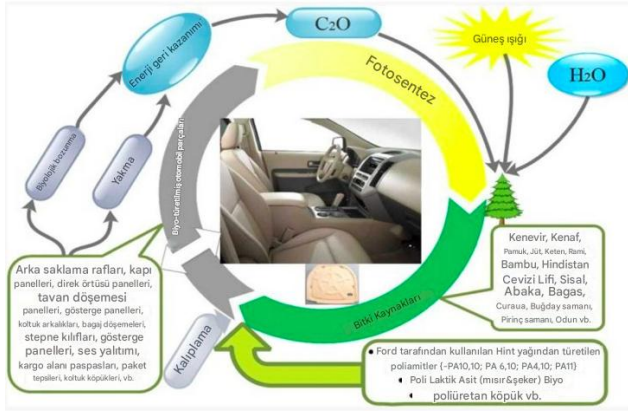
AcrodurVR polialkol çapraz bağlayıcı ve Dittrich ve Söhne GmbH'den önceden empenye edilmiş doğal lif paspaslardan oluşan benzersiz bir termoset akrilik kopolimer kullanarak BMW7 serisi sedan için basınçla kalıplanmış bir panel kapı üretmiştir (Stewart, 2010). AcrodurVR, doğal lifler için yüksek bir nem çekme değerine sahiptir ve bu, %70'e kadar yüksek yüklemelere sahip kompozitlerin üretilmesine olanak tanır. Çapraz bağlama işlemi sırasında fenol veya formaldehit gibi atmosfere zararlı maddeler salınmadığından, güvenli bir şekilde çalışılabilir. Orijinal akrilonitril bütadien stiren (ABS) yerine Acrodur/sisal kompozit kullanılması, mühendislerin duvar kalınlığını 0,25 inç/6,35 mm'den 0,094 inç/2,4 mm'ye düşürmesine olanak tanıyarak, dört kapılı sedanda 6 lb/2,7 kg ağırlık tasarrufu sağlamış, yakıt tüketimini, emisyonları azaltmış ve aracın daha iyi geri dönüştürülebilirliğini sağlamıştır (BASF Launches Thermosetting Acrylic, 2013). Son zamanlarda BM, çamurluk astarları, kalkanlar, tamponlar ve süspansiyon sistemlerinin bileşenleri üzerinde denemelere devam edilmektedir (Şekil 8).



Şekil 8. BMW 7 Sedan serisi sıkıştırma ile kalıplanmış ve BASF akrilik kopolimerlerden yapılmış kapı alt paneli (Shinoj, Visvanathan, Panigrahi, and Kochubabu, 2011).

Mitsubishi motorları, Fiat SpA ile birlikte bambu liflerini ve bitki bazlı bir reçine olan polibütilen süksinatı birleştirerek araç içi bileşenler geliştirdi. PLA, naylon/keten paspas yapımında, kenevir/pamuk ise iç mekan kaplamalarında, koltuk arkası kaplamalarında ve zemin panellerinde kullanıldı. Fiat, bir dizi modelinde petrol reçinelerinin yerine hint yağı türevi poliamidler ve soya bazlı poliüretanlar kullanılmaktadır. Ayrıca, üretimde kullanılan bazı plastikleri ve elastomerleri güçlendirmek için giderek artan bir şekilde biyo dolgu maddeleri kullanılmaktadır. 2011 yılında, bazı yakıt hatlarında hint yağı bazlı uzun zincirli poliamidin kullanılması, Fiat ve DuPont'a çevre kategorisinde Plastik Mühendisleri Derneği'nin (SPE) Otomotiv İnovasyon ödülünü kazandırdı (Niaounakis M. 2013). Volvo, ürünlerinde kenevir, jüt, kolza tohumu ve soya reçineleri gibi yenilenebilir malzemeler kullanıyor. Ayrıca, gösterge paneli ve

tavan gibi parçaları doğal liflerden oluşan otomobiller üretmek için çalışıyor. Fransız otomobil üreticisi Citroën'in son C3 Picasso modelinde lastikler hariç %11 oranında yeşil malzeme kullandığı bildirildi. Paket rafları, bagaj döşemeleri, kapı panelleri ve çamurluklar, ahşap, bitkisel lifler ve diğer yenilenebilir kaynaklardan geri dönüştürülmüş malzemelerle üretildi (Karus, Bouloc, Allegret, and Arnaud. 2013). Mitsubishi Chemical Co., Ltd., 2016 yılında ortak bir şirket kurarak ısıya dayanıklı, biyolojik olarak parçalanabilir bir PBS ürünü geliştirmeyi başarmıştır. Bu biyo-PBS, liflerle uyumludur ve mekanik özellikleri, mukavemeti ve sertliği artırır. Son olarak 2018 yılında Oml Ulusal Laboratuvarı araştırmacıları, Stiren/ABS elastomer termoplastikteki stiren kısmını değiştirebilen Lignin adlı yarı biyo polimeri geliştirdiler. Bu ABS/Lignin biyo kompoziti, saf ABS'den üç kat daha serttir ve üç defaya kadar geri dönüştürülebilir.



Şekil 9. Biyopolimerlerin otomobil gövdesinde kullanımı

<https://actgroup.ir/biopolymers-used-in-automobile-industry> (3.10.2025 erişim tarihi)

4- BİYOKOMPOZİT ÜRETİMİNDE KULLANILAN ÜRETİM SÜREÇLERİ

Günümüzde çeşitli kompozit üretim süreçleri kullanılmaktadır, ancak bunların hepsi otomotiv sektörü için biyokompozitlerin oluşturulmasında uygulanamamaktadır. Kullanılan malzemelerin özel özellikleri nedeniyle, bir şekillendirme işleminin kullanılabilmesi için minimum termal bozunma sağlaması gerekmektedir. Termoset ve termoplastik pres kalıplama, kullanılan şekillendirme yöntemlerinin büyük bir kısmını oluşturmaktadır (Karus, Bouloc, Allegret, and Arnaud. 2013). Basınçlı kalıplama, özellikle orta ve lüks otomobillerde kapsamlı, hafif ve yüksek kaliteli iç parçaların üretimi için yerleşik ve kanıtlanmış bir tekniktir; çünkü maliyet etkinliği, hafif yapıya uygunluğu, iyi

Çarpışma direnci ve deformasyon özellikleriyle  ne çıkar. Bu işlemede, formla aynı boyutta veya daha büyük olan düz yarı mamul ürünler veya hibrit keçeler, matrisle birlikte ön ısıtma istasyonuna (kalıp) konulan ve matris malzemesinin erime sıcaklığına kadar ısıtılan ve daha sonra basınçlı alet ünitesine yönlendirilen, yoğunlaştırılan ve yeniden şekillendirilen istenen parçanın boyutuna tam olarak göre kesilir (Bledzki, Jaszkievicz, Murr, Sperber, Leutzendorf, and Reu  Mann, 2008). Mercedes Benz E sınıfı; kapılarda epoksiyi sisal liflerle takviye ederek, iğneyle delinmiş dokunmamış elyaf malzemeyi ısıtılmış bir kalıba yerleştirerek, ardından ısıtılmış sıvı reçine dökerek ve kürlenme elde edilene kadar presleyerek yapmıştır (Brosius, 2014). Ford motor  irketi, doğal elyaf takviyeli otomobil parçaları oluşturmak için potansiyel bir prosedür olarak sac kalıplama sisteminin (SMC) uygulanabilirliğini bulmak için bir dizi proje yapmıştır. Bu kompozit yapım süreci, uzun kesiksiz elyaf şeritlerinin bir reçine banyosuna dağıtılmasını içermektedir. Cam elyafları bu uygulama için takviye olarak kullanılsada, bir araştırma kenevir liflerinin, dokunmamış kenevir malzemelerin, kenevir sicimlerinin ve bunların hibrit takviyeli PET ve vinil ester SMC'lerinin, geleneksel cam takviyeli SMC ile karşılaştırıldığında iyi mekanik özellikler göstermiştir (Flanigan, Williams, Lee, Houston, and Mielewski, 2005). Faurecia, performansı etkilemeden enjekte edilen parçaların yoğunluğunu azaltmak için reçine ve     irme maddesi veya gaz kombinasyonunun enjekte edilmesini içeren bir teknik olan "Mikro Proje" teknolojisinden yararlanmaktadır. Bu, geleneksel enjeksiyon sistemine kıyasla kapı panellerinde veya orta konsol parçalarında kullanıldığında %20 ağırlık azaltımı sağlamaktadır. Bu teknoloji şimdiye kadar Ford Escape'in g    terge panelinde ve orta konsolunda uygulandı. Başka bir boyut küçültme ve malzeme optimizasyonu sürecinde Faurecia, akıllı (Daimler)   ehir arabasının g    terge paneli üst kapağında ve diz yastığında doğal fiber PP (NFPP) kullandı; %50 PP ve %50 keten elyafı kullanılmaktadır. Bu teknoloji, Volkswagen Golf kapı panelini üretmek için kullanılan bir teknik olan tek adımda sıkıştırma ve kaplama işlemine olanak sağlayarak çevrim sürelerinin azaltılması gibi ek bir avantaj sağlamaktadır (Berger and Houston, 2013). Bu teknoloji, Volkswagen Golf kapı panelini oluşturmak için uygulanan bir teknik olan tek adımda sıkıştırma ve kaplama işlemine olanak sağlayarak çevrim sürelerinin azaltılması gibi ek bir avantaj sağlamaktadır. 1999 yılında, Bayer'in Hennecke Makine birimi, VR Baypreg olarak pazarlanan otomotiv poliüretan kompozitleri geliştirdi. Bu kompozitlerin üretimi, doğal liflerden araç içi parçaları üretmek için farklı takviye matları ve petek çekirdek kombinasyonları kullanan bir sistemi içeriyordu. Başlangıçta Baypreg sistemi, üretilen parçalara uygun genı  liklerde ve 700 ila 1.200 g/m   arasında değişen ağırlıklarda tedarik edilen keten ve sisal elyaf matlar kullanıyordu. Bunlar, nem içeriği %3'  n altına düşene kadar kurutulur ve ardından uygun boyutta kesilirdi. Kesilen matın her iki tarafına da

yüksek basınçlı bir ölçüm cihazı ve kendi kendini temizleyen karıştırma kafaları kullanılarak poliüretan karışımı püskürtülür ve ardından şekillendirme için kalıpta ısıtılırdı (Erdner, 2013). İlk ticari uygulaması, 1999 Almanya yapımı S-Serisi Mercedes-Benz'in iç kapı panelindeydi. Bu uygulamada, Bayer'den %35 Baypreg yarı sert Poliüretan (PUR) elastomeri, %65 keten/kenevir/sisal karışımıyla karıştırılarak 2 mm kalınlığında bir kapı paneli elde edildi (<https://www.ptonline.com/articles/k-2019-preview-resins-additives-for-sustainability-in-cars-electronics-packaging>). Teknoloji, bal peteği çekirdeğinin hafiflik özelliklerini elyaf takviyeli poliüretan dış yüzeyin yüksek mukavemet özellikleriyle birleştirerek olağanüstü yüksek bir sertlik-ağırlık oranı sağladı ve endüstriyel hijyenle karşılaştırıldığında maliyet açısından etkili olduğu bulundu. Şu ana kadar Audi, BMW ve Mercedes dahil olmak üzere bir dizi otomobil üreticisi tarafından kapı panelleri, stepne kılıfları, yük tabanları, güneşlikler ve diğer iç döşeme parçaları için kullanılmıştır (Seagrave, 2003). 2010 yılında Baypreg, Formula-1 arabalarında kullanılanlara benzer bir bağlanmış iki parçalı monokok yapı üretmek için kullanılmıştır; Mazda'nın MX-0 konsept aracının güvenlik hücresi, alt şasileri, gövde panelleri ve iç yüzeyleri için kullanılmıştır ve deneme otomotiv ağırlığında yüksek oranda bir azalma göstermiştir (Stewart, 2011). Uygulamaları benzersiz ve karmaşık şekiller gerektiren otomotiv parçaları için enjeksiyon kalıplama kullanılmıştır. Bu, düşük viskoziteyi korumak için düşük moleküler ağırlıklı bir polimerle yapılmış bir kalıba malzemelerin enjekte edilmesini içerir (Bledzki, Sperber, and Faruk, 2002). DaimlerChrysler, ekspres işleme olarak bilinen bir teknikle iç otomobil parçaları için keten elyaf takviyeli PP kompozitlerinin üretimi için bir ekstrüzyon pres işlemi geliştirmiştir (Bogoeva-Gaceva, Avella, Malinconico, Buzarovska, Grozdanov, Gentile, and Errico M, 2007).

5- SONUÇ

Otomotiv endüstrisinin bu malzemelere olan ilgisi son birkaç yıldır giderek artmaktadır ancak şu ana kadar yapılmış önemli araştırmalara rağmen henüz tam ticari potansiyele ulaşamamışlardır ve bu nedenle endüstrideki taleplerinin artmaya devam etmesi beklenmektedir. Avrupalı otomobil üreticileri, Avrupa'daki doğal elyaf pazarının 2030 yılına kadar 19.231,8 milyon ABD doları tahmini gelire ulaşması beklenmektedir. Avrupa doğal elyaf pazarının 2025-2030 yılları arasında yıllık bileşik büyüme oranının %5,2 olması beklenmektedir (Europe Natural Fiber Market Size & Outlook, 2024-2030)

<https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/natural-fiber-market/europe>). Doğal elyaf, otomotivde ağırlık azaltımı elde etmek için umut verici bir pratik araçtır ve yakıt tüketiminin yaklaşık %75'i doğrudan araç

ağırlığıyla ilişkili olduğundan otomobil şirketleri bu alanda tutarlı bir araştırma ve teknik yenilikleri sürdürmek zorundadır.

2030'ların başlarına kadar elektrikli araçların (EV) satış fiyatları fosil yakıtlı araçların altında olması ve dünyada EV satışlarının yirmi beş yıl sonra da yılda 50 milyon adet olması beklenmektedir. Önümüzdeki 20 yıl içinde otomobillerin % 26'sının otonom sürüş yeteneğine sahip olması ve hidrojenle çalışan araç sayısında da %38 oranında artması öngörülmektedir. Her ne kadar elektrik motorlu araçlara enerji sağlayan lityum iyon ve hidrojen teknolojilerindeki gelişimin hammaddenin ucuzlamasına bağlı olarak artacağı düşünülse de motorlu araç karoserlerindeki hafiflik ve dayanım sağlayan kompozit malzemelerin, performanslı ve ekolojik olarak üretilmesine bağlı olacağı da yadsınamaz bir gerçektir. Otomobillerin bir ulaşım aracı olması yanı sıra teknolojik ve akıllı cihazlara evrildiği ve bu açıdan bakıldığında, küresel otomotiv sektörünün geleceğini otonom sürüş, elektrifikasyon, mobilite ve araç paylaşımı gibi konuların yönlendirmesi beklenmektedir (Ağırgan, 2023). Elektrikli araçlar için yenilikçi batarya entegrasyon çözümleri ve hidrojenle çalışan araçlara uygun yakıt depolama tankları üretilerek yeni otomobillerin geliştirilmesine olanak sağlanmaktadır (<https://tto.boun.edu.tr> erişim 22.08.2023). Otomotiv yakıt tüketimini ve dolayısıyla sera gazı emisyonlarını azaltmanın bir yolu olarak daha iyi kullanım ömrü ve hafif otomobil parçalarına olan talep, otomotivde yeşil kompozitlerin uygulanabilirliği üzerine artan araştırmaları teşvik etmeye devam edecektir.

Son yıllarda, dünya otomotiv endüstrisi için Yeşil kompozit üretim maliyetinin fazla olması önemli bir engeldir, ancak endüstriyel ölçekli uygulamalardaki talep şüphesiz fiyatlarını daha uygun seviyelere düşürme şeklinde olacaktır.

KAYNAKÇA

- Ağırhan, M. 2020. Çeltik Lifi Takviyeli Polilaktik Asit Matrisli Biyobozunur Kompozit Malzemenin Termal, Mekanik ve Akustik Özelliklerinin Araştırılması. Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Doktora Tezi, Edirne.
- Ağırhan, M. 2023. Otomotiv Endüstrisinde Kompozit Malzeme Kullanımı, *Electronic Journal of Vocational Colleges-December/Aralık 2023*; 13(2); 51-64. DOI: 10.17339/ejovoc.1407005
- Ağırhan, M. ve Taşkın, V. 2023. *Çeltik Lifi Takviyeli Biyo Kompozit Malzemenin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, *Tekstil ve Mühendis*, 30: 129, 1-11. <https://doi.org/10.7216/teksmuh.1272228>
- Akampunguza, O., Wambua, P. M., Ahmed, A., Li, W., Qin, X.H. 2016. Review of the Applications of Biocomposites in the Automotive Industry. *Polym. Compos.*, 38:2553–2569, 2017. VC 2016 Society of Plastics Engineers.
- Andresen C., Demuth C., Lange A., Stoick P., and Pruszek R. 2012. “Biobased Automobile Parts Investigation,” USDA Report.
- Available at: <http://www.compositesworld.com/>, accessed on August 12.2014.
- BASF Launches Thermosetting Acrylic. Available at: <http://www.compositesworld.com>, accessed on October 09, 2013.
- Beckermann G., Doctoral Dissertation Thesis, The University of Waikato, Hamilton, Waikato, New Zealand, 2007.
- Berger L. and Houston D., 2013. “Investigation of Sheet Mould- ing Compound made with Soy Based and Petroleum Based Resins,” SPE Report.
- Bledzki A. K., Jaskiewicz A., Murr M., Sperber V. E., Leutzendorf R., and Reußmann T., (2008). *Properties and Performance of Natural-Fibre Composites*, Woodhead Publishing, Cambridge, UK.
- Bledzki A. K., Sperber V., and Faruk O. 2002. *Natural and Wood Fibre Reinforcement in Polymers*, Smithers Rapra Publishing, Shrewsbury, Shropshire, UK.
- Bledzki, A.K., Faruk, O., and Sperber, V.E. 2006. Cars from bio-fibres. *Macromol. Mater. Eng.* 291(5):449–57.
- Bogoeva-Gaceva G., Avella M., Malinconico M., Buzarovska A., Grozdanov A., Gentile G., and Errico M.E., 2007. *Polym. Compos.*, 28, 98.
- Brosius D., 2014. *Natural Fiber Composites Slowly Take Root*.
- Carus M, Elder A, Dammer L, Korte H, Scholz L, Essel R, Breitmayer E, Barth M. WPC/ NCF market study: European and global markets 2012 and future trends in automotive and construction (update 2015-06). Nova Institute for Ecology and Innovation.

- Charlet, K. 2012. Natural fibres as composite reinforcement materials: Description and new sources. In: John, M.J. and Thomas, S., Eds. *Natural Polymers*, Vol. 1. Cambridge, England: Royal Society of Chemistry. pp. 37–62.
- Dwivedi U.K, Hashmi S.A.R., Naik A., Joshi R., and Chand N., 2013. *Polym. Compos.*, 34, 650.
- Erdner T., The Natural Alternative for Reinforcing PU Parts. Available at: <http://www.bayermaterialsciencenafta.com>, accessed on July 18, 2013.
- Faruk, O., Birat, K.C., Sobh, A., Tjong, J. and Sain, M. 2017. Natural Fiber Reinforced Thermoplastic Composites. Edited by Omar Faruk, Jimi Tjong, Mohini Sain. Chapter two Bio-Fiber Thermoset Composites, 1-31.
- Faruk, O., Bledzki, A.K., Fink, H., and Sain, M. 2014. Progress report on natural fiber reinforced composites. *Macromol. Mater. Eng.* 299(1):9–26.
- Finkbeiner M. and Hoffmann R., 2006. *Int. J. Life Cycle Assess.*, 11, 240.
- Flanigan C., Williams K., Lee E., Houston D., and Mielewski D., (2005). in Global Plastics Environmental Conference (GPEC) Atlanta, Georgia, USA.
- Gassan, J. and Bledzki, A.K. 1999. Possibilities for improving the mechanical properties of jute/epoxy composites by alkali treatment of fibres. *Composites Science and Technology*. 59(9):1303–9.
- Holbery J. and Houston D., *JOM*, 58, 80 (2006).
- <https://actgroup.ir/biopolymers-used-in-automobile-industry/>. (Erişim: 3.10.2025)
- <https://tto.bogazici.edu.tr> erişim 22.08.2023.
- <https://www.ekonomim.com/kuresel-ekonomi/en-cok-otomobil-ureten-30-ulke-belli-oldu-turkiye-kacinci-sirada-haberi-789367>
- <https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/natural-fiber-market/europe> erişim: 10.2025.
- Huda L.T.D.M, Ray D, Mohanty AK, and Misra M. 2008. “in Properties and Performance of Natural-Fibre Composites”, Woodhead Publishing, UK).
- John M.J. and Thomas, S. *Carbohydr. Polym.*, 71, 343 (2008).
- John MJ, Thomas S, eds. *Natural Polymers*, Vol. 1, pp. 37–62. Reproduced by permission of The Royal Society of Chemistry. Mussig J, Sloomaker T: In *Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Applications*, ed. J. Mussig. pp. 44–48. 2010. Copyright Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Reproduced with permission. Saheb DN, Jog JP, *Advances in Polymer Technology* 18(4):351–63, 1999.
- Joshi, S., Drzal, L., Mohanty, A., and Arora, S. 2004. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced Composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 35(3):371–6.

- Karus M., Bouloc P., Allegret S., and Arnaud L. 2013. in *Hemp: Industrial Production and Uses*, France, CABI International, Oxfordshire, UK
- Karus, M., Kaup, M., and Ortmann, S. (Eds.). 2003. *Use of Natural Fibres in Composites in the German and Austrian Automotive Industry*. Nova-Institut GmbH, Hürth.
- Kim H.-J., Lee H.-J., Chung T.-J., Kwon H.-J., Cho D., and. Tze W. T. Y. 2013. *Polymer Composites*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany.
- Koronis G., Silva A., and Fontul M. 2013. *Compos. Part. B- Eng.*, 44, 120.
- La Mantia F.P. and Morreale M., *Compos.* 2011. Part A, 42, 579.
- Mann D., Van den Bos J. C., and Way, A. 1999. *Automotive Plastics and Composites*, 2nd ed., Elsevier Science, Amsterdam.
- Mohanty A.K., Misra M., and Drzal L.T. 2002. *Polym. Environ.*, 10, 19.
- Mohanty AK, Misra M, Drzal LT. 2005. Natural fibers, biopolymers, and biocomposites. CRC Press; April 8, 2005, ISBN 9780849317415. e CAT# 1741.
- Mohanty, A.K. and Misra, M. 1995. Studies on jute composites—A literature review. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 34(5):729–92.
- Natural Fibers: The New Fashion in Automotive Plastics. Available at: <http://www.ptonline.com/>, <https://www.ptonline.com/articles/k-2019-preview-resins-additives-for-sustainability-in-cars-electronics-packaging>
- Niaounakis M. 2013. *Biopolymers: Reuse, Recycling, and Disposal*, Kidlington, Elsevier, Oxford, UK.
- Park H.S., Dang, X.P., Roderburg, A. and Nau, B. 2013. *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, 6, 44.
- Rajpurohit, A. and Henning, F. 2017. *Lightweight and Sustainable Materials for Automotive Applications*, Edited by Omar Faruk, Jimi Tjong, Mohini Sain. Chapter two Bio-Fiber Thermoset Composites, 39-92.
- Sahari, J. and Sapuan, S.M. 2011. Natural fiber reinforced biodegradable polymer composites. *Reviews on Advanced Materials Science*. 30:166–74.
- Sain, M. and Panthapulakkal, S. 2006. Bioprocess preparation of wheat straw fibers and their characterization. *Ind. Crops Prod.* 2:1–8.
- Saxena M., Pappu A., Haque R., and Sharma A., 2011. in *Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites*, Springer, Berlin.
- Seagrave T. D. 2003. *Automotive Polyurethane Composite Parts made with Natural Fiber Mats and Honeycomb Cores*; Bayer and Hennecke GmbH Report.

- Shinoj S., Visvanathan R., Panigrahi S., and Kochubabu M. (2011). *Ind. Crop. Prod.*, 33, 7.
- Sinon F.G., Kohler R., Cotter M., and Meuller J. 2011. *J. Bio- based. Mater. Bio.*, 5, 433 (2011).
- Stewart R., (2010). *Reinf. Plast.*, 54, 22.
- Stewart R., (2011). *Reinf. Plast.*, 55, 22.
- Summerscales J., Dissanayake N., Virk A., and Hall, W. 2010. *Compos. Part A*, 41, 1336.
- Koronis G., Silva A., and Fontul M. 2013. *Compos. Part. B- Eng.*, 47, 391.
- Toyota Green Innovations. Available at: [https://www .toyota.com/ content /dam/tusa/env ironmentreport/down loads/2024NAER_Final_Feb25.pdf](https://www.toyota.com/content/dam/tusa/env ironmentreport/downloads/2024NAER_Final_Feb25.pdf)
- Witten, W. and Kraus, E. 2014. Report: Market developments, trends, challenges and opportunities. *Composites Market Report*.
- Yan, L., Chouw, N., and Jayaraman, K. 2014. Flax fibre and its composites—A review. *Composites Part B: Engineering*. 56:296–317.
- Zimniewska M., Wladyka-Przybylak M., and Mankowski J. 2011. *Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites*, Springer, Berlin.

BÖLÜM 20

Endüstri 4.0 Perspektifinde Montaj Odaklı Tasarım: Prensipler ve Uygulamalar

Tuğçe Tezel¹ & Volkan Kovan²

¹ Doç. Dr. , Akdeniz Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü
ORCID: 0000-0003-0139-442X

² Prof. Dr., Akdeniz Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü
ORCID: 0000-0002-0599-525X

1. GİRİŞ

Endüstriyel üretimin evrimsel sürecine bakıldığında, montaj kavramının sadece parçaların fiziksel olarak bir araya getirilmesi işleminden, ürünün nihai maliyetini, kalitesini ve pazara sunuş süresini belirleyen stratejik bir mühendislik disiplinine dönüşümü çarpıcı bir şekilde görülmektedir. İnsanlık tarihinin erken dönemlerinde, örneğin M.Ö. 3000’li yıllarda Mısır’da üretilen metal eserlerde veya Orta Çağ zanaatkarlarının atölyelerinde, montaj bir “standart” işlemi değil, bir “uydurma” sanatıydı. Her bir parça, bir diğerine göre özel olarak eğelenir, alıştırlılır ve birleştirilirdi. Bu dönemde tasarım ve üretim, aynı zanaatkarın zihninde ve elinde bütünleşmiş süreçlerdi; dolayısıyla bir “montaj problemi” kavramından veya montaj odaklı bir tasarımdan söz etmek mümkün değildi.

Ancak Sanayi Devrimi ile birlikte bu dengede köklü bir değişim yaşanmıştır. 18. yüzyılın sonlarında Fransız topçu subayı Honoré Blanc ve daha sonra 19. yüzyılın başlarında Amerikalı mucit Eli Whitney’in misket tüfeklerinde tanıttığı “Değiştirilebilir Parça” sistemi, modern montajın miladı olarak kabul edilebilir. Whitney, parçaların birbirine alıştırılması zorunluluğunu ortadan kaldırarak, tolerans sınırları içerisinde üretilmiş herhangi bir parçanın, herhangi bir tüfek gövdesine monte edilebilmesini sağlamıştır. Bu, montajın bir “el sanatı” olmaktan çıkıp, bir “mühendislik bilimi”ne dönüşmesinin ilk adımıdır. 1913 yılında Henry Ford’un manyeto montaj hattında başlattığı ve kısa sürede tüm şasi üretimine yaydığı “Hareketli Montaj Hattı” devrimi ise, montajı durağan bir işlemten sürekli akan dinamik bir sürece dönüştürmüş, montaj süresini ve maliyetini ürün tasarımının en kritik parametresi haline getirmiştir (Bralla, 1999).

Günümüzde ise küresel rekabet koşulları, mühendisleri Ford’un hız odaklı yaklaşımının çok daha ötesine geçmeye zorlamaktadır. 21. yüzyılın mühendislik dünyasında bir ürünün sadece çalışması veya hızlı üretilmesi yeterli değildir. Ürünün aynı zamanda robotik sistemlerle (Endüstri 4.0) uyumlu olması, bakımının kolay yapılması, lojistik süreçlerde az yer kaplaması ve kullanım ömrünü tamamladığında döngüsel ekonomi prensiplerine (Sürdürülebilirlik) uygun olarak kolayca demonte edilebilmesi gerekmektedir. Yapılan kapsamlı maliyet analizleri, bir ürünün toplam üretim maliyetinin yaklaşık %70’inin tasarım aşamasındaki kararlarla belirlendiğini, ancak tasarım sürecinin kendisinin toplam proje bütçesinin sadece %5’ini oluşturduğunu göstermektedir (Boothroyd & Dewhurst, 1983). Bu asimetrik ilişki, tasarımcının omuzlarına büyük bir sorumluluk yükler: Kâğıt üzerinde veya CAD ekranında çizilen her bir çizgi, atölye zemininde montaj süresine, işçilik maliyetine, fiktür yatırımına ve potansiyel bir kalite problemine dönüşme riski taşır.

Geleneksel mühendislik yaklaşımında, uzun yıllar boyunca tasarım (Konstrüksiyon) ve imalat/montaj süreçleri birbirinden kopuk, yalıtılmış silolar halinde yürütülmüştür. Literatürde “Duvarın Ötesine Fırlatmak” (Over-the-wall Engineering) olarak adlandırılan bu yaklaşımda; tasarımcılar ürünü sadece

fonksiyonel gereksinimlere göre tasarlayıp teknik resimleri üretim departmanına devreder, üretim mühendisleri ise bu tasarımı hayata geçirmeye çalışırken karşılaştıkları montaj zorluklarını çözmekle uğraşırdı. Bu kopukluk; sayısız mühendislik değişikliği talebine, üretim gecikmelerine, yüksek hurda oranlarına ve pazara giriş süresinin uzamasına yol açmıştır. İşte bu verimsizliği ortadan kaldırmak ve tasarım ile üretim arasındaki duvarları yıkmak amacıyla, 1980’lerde “Eş Zamanlı Mühendislik” felsefesinin en güçlü uygulaması olarak Montaj Odaklı Tasarım (Design for Assembly - DFA) metodolojisi geliştirilmiştir.

DFA, en temel tanımıyla; ürün yapısının, montaj işlemlerinin kolaylığını, hızını ve verimliliğini artıracak şekilde optimize edilmesidir. Ancak bu optimizasyon, ürünün fonksiyonundan veya güvenilirliğinden ödün vermek anlamına gelmez. Aksine, Pahl ve Beitz’in (2021) sistematik tasarım yaklaşımında vurguladığı “Basitlik” ilkesi, iyi bir tasarımın en temel göstergesidir. Karmaşık, çok sayıda bağlantı elemanı içeren ve montajı özel el becerisi gerektiren bir ürün, genellikle tasarımcının problemi en yalın haliyle çözemediğinin bir işaretidir. Boothroyd ve Dewhurst (1983) tarafından geliştirilen sistematik DFA analizi, tasarımcıyı sürekli olarak şu üç temel soruyu sormaya teşvik eder: (i) Bu parça, diğer parçalara göre hareket etmek zorunda mı? (ii) Bu parça, yalıtım veya estetik gibi nedenlerle farklı bir malzemeden yapılmak zorunda mı? (iii) Bu parça, montaj veya bakım amacıyla sökülebilir olmak zorunda mı? Eğer bu soruların cevabı “Hayır” ise, o parça ayrı bir eleman olarak varlığını sürdürmemeli, ana gövdeyle bütünleştirilmelidir.

Endüstri 4.0 çağına girdiğimiz bu dönemde ise DFA prensipleri, otomasyon ve dijitalleşme ile birlikte yeni bir boyut kazanmıştır. Geleneksel DFA kuralları (örneğin parçaların yukarıdan aşağıya yerleştirilmesi veya pah kırılması) büyük ölçüde manuel montajın ergonomisi üzerine kuruluyken; günümüzün “Akıllı Fabrikalarında” insan operatörlerin yerini giderek artan oranda robotlar ve insanla işbirliği içinde çalışan kobotlar (Collaborative Robots) almaktadır. Bir insan operatör için “kolay” olan bir montaj işlemi -örneğin esnek bir kabloyu dar bir delikten geçirmek veya yağlı bir parçayı dokunarak hissetmek- bir robot için imkansız derecede karmaşık olabilir. Bu nedenle modern DFA yaklaşımı, sadece insanın el becerisini değil; robot tutucuların yeteneklerini, görüntü işleme sistemlerinin kısıtlarını ve otomasyonun gerektirdiği rijitliği de dikkate almak zorundadır. Dolgui vd. (2022) tarafından yapılan güncel çalışmalar, “Montaj 4.0” konseptinin, tasarımcıdan sadece parçayı değil, montaj sürecinin kendisini de bir “sistem” olarak tasarlamasını beklediğini ortaya koymaktadır.

Bu kitap bölümünün amacı; tarihsel kökenlerinden başlayarak, modern ürün geliştirme süreçlerinin vazgeçilmez bir parçası haline gelen Montaj Odaklı Tasarım prensiplerini kapsamlı bir şekilde incelemektir. Bölüm boyunca; parça sayısının azaltılması ve entegre tasarım yaklaşımı, standartlaşma stratejileri, montaj işlemlerini kolaylaştıran geometrik tasarım kuralları ve bağlantı

teknikleri; hem teorik çerçevede hem de endüstriyel uygulama örnekleriyle ele alınacaktır. Çalışmanın ilerleyen kısımlarında, özellikle Bode (1996) ve Bralla (1999) gibi temel kaynaklardan derlenen pratik tasarım kılavuzları, görsel örneklerle desteklenerek sunulacaktır. Son olarak, montaj tasarımının geleceğini şekillendiren Dijital İkiz simülasyonları ve İnsan-Robot-İşbirliği kavramları, güncel literatür ışığında tartışılarak tasarımcılar için bir yol haritası çizilecektir.

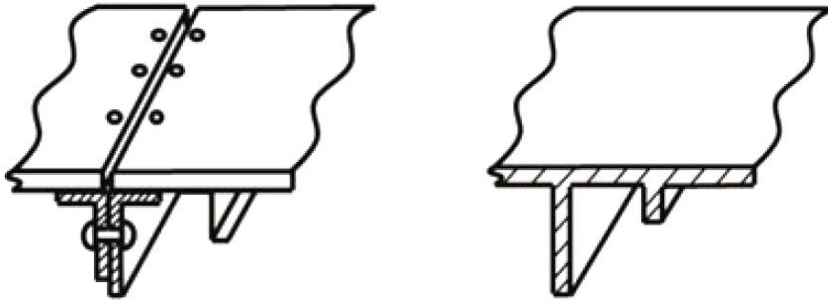
2. MONTAJ ODAKLI TASARIMIN TEMEL PRENSİPLERİ

Montaj odaklı tasarım, karmaşık matematiksel formüllerden ziyade, tasarımcının konstrüksiyon aşamasında bir refleks olarak uygulaması gereken temel stratejiler bütünüdür. Ürün mimarisinin sadeleştirilmesi, sadece montaj hattındaki işçilik maliyetlerini düşürmekle kalmaz; aynı zamanda stok yönetimi, kalite kontrol ve tedarik zinciri süreçlerini de iyileştirir. Pahl ve Beitz'in (2021) sistematik tasarım metodolojisinde vurguladığı “Fonksiyonel Entegrasyon” kavramı ile Bralla'nın (1999) “Üretilbilirlik” ilkeleri harmanlandığında, DFA'nın üç ana sütunu ortaya çıkar: Parça sayısının azaltılması, standartlaşma ve modüler yapı.

2.1. Diferansiyel Tasarıma Karşı Entegre Tasarım

Geleneksel makine tasarımında, karmaşık bir geometriyi elde etmek için genellikle “Diferansiyel Tasarım” (Differential Design) yaklaşımı benimsenmiştir. Bu yaklaşımda, üretimi kolay (örneğin düz sac levhalar veya standart profiller) basit parçalar, çok sayıda bağlantı elemanı (civata, somun, perçin) kullanılarak bir araya getirilir. Ancak bu yöntem, montaj süresini uzattığı gibi tolerans yığılması riskini de artırır. Her bir ek parça, montaj hattında yeni bir operasyon, yeni bir fiktürleme ihtiyacı ve potansiyel bir hata kaynağı demektir.

Modern DFA yaklaşımı ise bunun tam tersi olan “Entegre Tasarım”ı (Integral Design) savunur. Malzeme teknolojisindeki ve imalat yöntemlerindeki (özellikle plastik enjeksiyon, hassas döküm ve eklemeli imalat) gelişmeler sayesinde, eskiden çok sayıda parçadan oluşan bir montaj grubu, artık tek bir parça olarak üretilabilmektedir.



Şekil 1. Diferansiyel (parçalı/kaynaklı) ve Entegre (tek parça döküm) tasarım yaklaşımlarının yapısal karşılaştırması (Pahl ve Beitz, 2021).

Şekil 1’de görüldüğü üzere, entegre tasarım yaklaşımı sadece montaj işçiliğini ortadan kaldırmakla kalmaz; aynı zamanda bağlantı elemanlarının titreşim altında gevşeme riskini yok eder, yapının rijitliğini artırır ve toplam ağırlığı azaltır. Ancak tasarımcı, entegrasyon kararı verirken artan kalıp maliyetleri ile azalan montaj maliyetleri arasındaki dengeyi gözetmelidir. Düşük üretim adetlerinde diferansiyel tasarım ekonomik olabilirken, seri üretimde entegre tasarım kaçınılmaz bir zorunluluktur.

2.2. Parça Sayısını Azaltma Metodolojisi (Boothroyd & Dewhurst Kriterleri)

“En iyi parça, hiç var olmayan parçadır.” DFA felsefesinin bu temel mottosunu hayata geçirmek için tasarımcılar, montajdaki her bir parça için Boothroyd ve Dewhurst (1983) tarafından geliştirilen sistematik sorgulama yöntemini kullanmalıdır. Tasarımcı, montaj listesindeki her bir bileşen için şu üç kritik soruyu sormalı ve cevaplamalıdır:

1. **Göreceli Hareket:** Bu parça, montajlı olduğu diğer parçalara göre hareket etmek (dönmek, kaymak vb.) zorunda mı?
2. **Malzeme Farklılığı:** Bu parça, elektriksel yalıtım, ısı iletimi, manyetik geçirgenlik veya titreşim sönümleme gibi fiziksel nedenlerle, bağlı olduğu parçadan farklı bir malzemeden yapılmak zorunda mı?
3. **Sökülebilirlik:** Bu parça, montajın diğer kısımlarına erişmek (bakım kapağı gibi) veya aşınan bir elemanı değiştirmek amacıyla sökülebilir olmak zorunda mı?

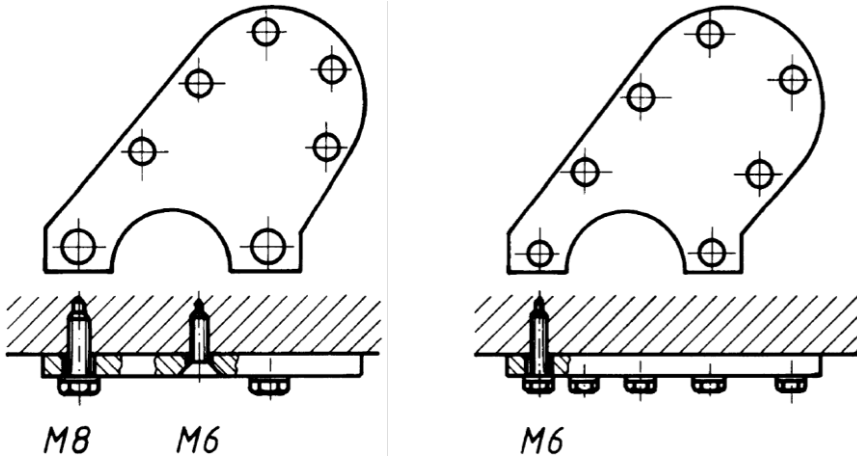
Eğer bu üç sorunun cevabı da “Hayır” ise, o parça teorik olarak gereksizdir ve bağımsız bir eleman olarak varlığını sürdürmemelidir; ana gövdeyle veya komşu parçayla birleştirilmelidir. Yapılan saha çalışmaları, parça sayısındaki her azaltmanın, sadece montaj süresini değil, lojistik ve stok maliyetlerini de %5 ila %10 arasında düşürdüğünü göstermektedir.

2.3. Bağlantı Elemanlarında Standardizasyon ve Maliyet Yönetimi

Tasarımcıların en sık düştüğü hatalardan biri, aşırı mühendislik yaparak her bağlantı noktası için o bölgedeki yüke özel vida seçmeye çalışmaktır. Bu durum, aynı ürün üzerinde M4, M5 ve M6 gibi farklı çaplarda veya düz tornavida, yıldız ve alyan gibi farklı baş yapılarında vidaların bir arada kullanılmasına yol açar. Bu çeşitlilik, montaj hattında operatörün sürekli el aleti değiştirmesine (tool change) veya robotik sistemlerde magazin değişimlerine neden olur.

Bralla (1999) tarafından sunulan detaylı maliyet analizlerine göre, montaj hattında operatörün elindeki aleti bırakıp yenisini alması, bir vidayı sıkma işleminden çok daha fazla zaman almaktadır. Bu verimsizliği önlemek için DFA prensipleri şu kuralları dikte eder:

- **Tek Tip Bağlantı:** Mümkün olan her yerde, ürün genelinde tek bir vida çapı ve boyu standartlaştırılmalıdır. Örneğin, küçük yük taşıyan bir noktada M4 yeterli olsa bile, eğer ürünün geri kalanında M5 kullanılıyorsa, o noktada da M5 kullanmak toplam maliyeti düşürür. Aşırı boyutlandırmadan kaynaklanan malzeme maliyeti artışı, operasyonel verimlilik kazancının yanında ihmal edilebilir düzeydedir.
- **Bağlantı Elemanı Sayısını Minimize Etme:** Dört vida ile yapılan bir bağlantı yerine, parçaların geometrik olarak birbirine geçmesi sağlanarak tek vida ile sabitleme tercih edilmelidir.
- **Standart Parça Kütüphanesi:** Şirket veya proje bazında izin verilen bağlantı elemanları listesi sınırlandırılmalıdır.



Şekil 2. Montaj verimliliğini artırmak için bağlantı elemanlarında standardizasyon: Farklı vida başları (sol) yerine tek tip bağlantı elemanı kullanımı (sağ) (Bode, 1996).

Bu stratejiler, hatalı montaj (yanlış vidayı yanlış deliğe zorlama) riskini ortadan kaldırarak kalite maliyetlerini de minimize eder.

3. MONTAJ İŞLEMLERİ İÇİN GEOMETRİK TASARIM KURALLARI

Bir parçanın tasarım masasından çıkıp nihai ürün üzerindeki yerini alması süreci, fiziksel olarak iki temel aşamadan oluşur: Parçanın kutudan veya magazinden alınması ve hedef noktaya yerleştirilip sabitlenmesi. Tasarımcının görevi, parça geometrisini bu iki aşamadaki fiziksel zorlukları minimize edecek şekilde şekillendirmektir. Bode (1996) ve Bralla (1999) tarafından sistematize edilen aşağıdaki geometrik kurallar, montaj verimliliğinin alfabesini oluşturur.

3.1. Tutma ve Taşıma Odaklı Tasarım

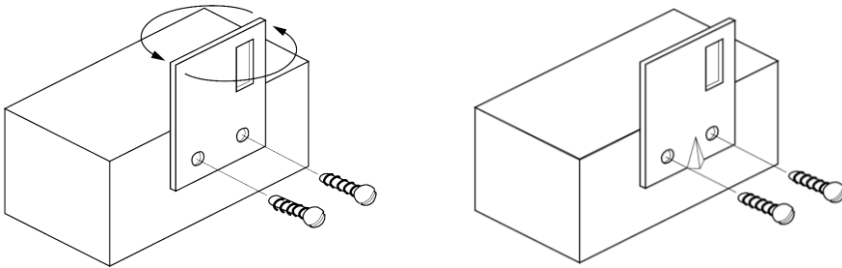
Montaj süresinin önemli bir kısmı, operatörün veya robotun parçayı doğru oryantasyonda kavramasına harcanır. Parçaların dökme (bulk) olarak saklandığı durumlarda yaşanan en büyük sorun, parçaların birbirine dolanması veya iç içe geçmesidir.

- **Karışmayı Önleme:** Özellikle yaylar, segmanlar veya kanca formlu parçalar, kutu içerisinde birbirine kilitlenme eğilimindedir. Bu durum, operatörün parçaları ayırmak için zaman kaybetmesine ve hatta parçaların deforme olmasına yol açar. Tasarımcı, yayların uçlarını kapatarak veya açık segmanların ağız açıklığını parça kalınlığından daha dar tasarlayarak bu sorunu kaynağında çözmelidir.



Şekil 3. Yay ve benzeri elemanlarda dolanmayı ve montaj zorluklarını önleyici geometrik tasarım tedbirleri (Bode, 1996).

- **Simetri ve Oryantasyon:** İdeal bir montaj parçası tam simetrik olmalıdır (küre gibi); böylece operatör parçayı eline nasıl alırsa alsın, düzeltme hareketi yapmadan monte edebilir. Ancak fonksiyonel nedenlerle simetri mümkün değilse, parçanın yönünün “görsel veya dokunsal” olarak anında anlaşılmasını sağlayan belirgin bir asimetri (Poka-Yoke) eklenmelidir. Belirsiz asimetri, montaj hatalarının en büyük nedenidir.

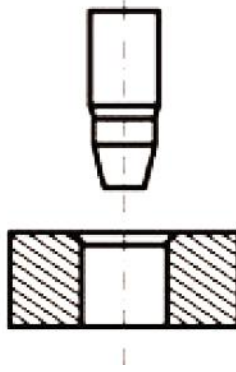


Şekil 4. Montajda oryantasyon hatalarını önlemek için parça geometrisinde tam simetri veya belirgin asimetri kullanımı (Bralla, 1999).

3.2. Yerleştirme ve Hizalama Kolaylığı

Montajın en kritik anı, parçanın (mil, pim, vida) yuvaya (delik) girdiği andır. Bu aşamada yaşanacak sıkışmalar veya takılmalar, montaj hattını durdurabilir.

- **Pah Kırma:** Mil ve delik montajlarında, her iki parçanın ucuna da mutlaka pah veya radyüs verilmelidir. Keskin köşeli bir mili, keskin köşeli bir deliğe sokmaya çalışmak, sonsuz hassasiyet gerektirir. Şekil 5'te gösterildiği gibi, uygun açılı bir pah (genellikle 30-45 derece), parçanın yuvaya girerken kendi kendini merkezlemesini sağlar ve montaj kuvvetini düşürür.

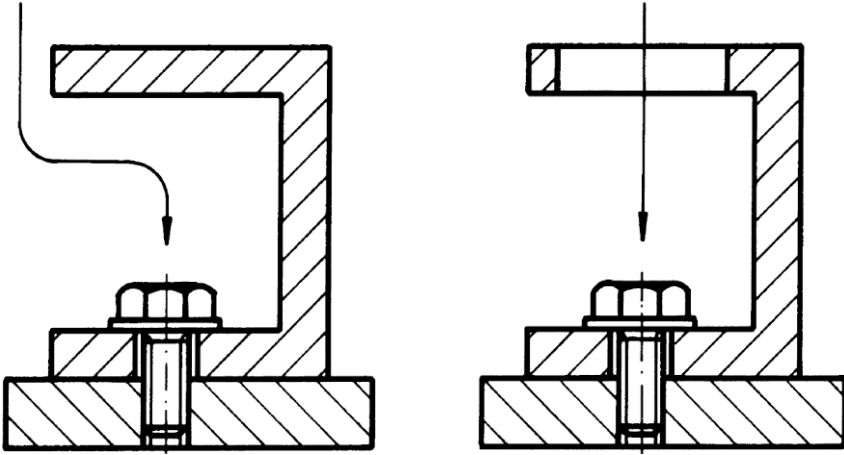


Şekil 5. Birleştirme işlemlerinde sıkışmayı önlemek ve merkezlemeyi sağlamak için pah kullanımı (Pahl ve Beitz, 2021).

3.3. Erişim ve Birleştirme

Parça yerine oturduktan sonra, sabitleme işleminin yapılabilmesi için uygun “Erişim Alanı”na ihtiyaç vardır.

- **Takım Boşlukları:** Tasarımcı, cıvatanın sadece kendi çapını değil, onu sıkacak olan anahtarın, tornavidanın veya robotik tabancanın hacmini de CAD modelinde (sanal olarak) rezerve etmelidir. Köşelere, duvar diplerine veya diğer bileşenlerin altına gizlenmiş bağlantı noktaları, montajı imkânsız hale getirebilir.
- **Yerçekimi Yönünde Montaj:** En verimli montaj, parçaların yukarıdan aşağıya (Z eksenı boyunca) üst üste dizildiği “sandviç” montajdır. Bu yöntemde yerçekimi, parçaları yerinde tutmaya yardımcı olur ve karmaşık fiğstür ihtiyacını ortadan kaldırır. Parçayı çevirmeyi gerektiren her tasarım kararı, maliyeti artırır.



Şekil 6. Montaj aletleri için gerekli operasyonel erişim hacimlerinin (anahtar boşluğu) tasarımı (Bode, 1996).

Bu geometrik kurallara uyulması, sadece montaj hızını artırmakla kalmaz; aynı zamanda parçaların montaj sırasında zorlanarak hasar görmesini de engeller.

4. BİRLEŞTİRME YÖNTEMLERİ VE SEÇİMİ

Montaj sürecinin toplam maliyeti üzerinde en belirleyici faktör, şüphesiz birleştirme yönteminin seçimidir. Tasarımcılar genellikle alışkanlık veya güvenilirlik algısı nedeniyle vidalı bağlantılara yönelse de, DFA perspektifinden bakıldığında vidalı bağlantı genellikle en pahalı ve en yavaş seçenektir. Bralla (1999) tarafından yapılan kapsamlı zaman etüdü çalışmaları, birleştirme yöntemleri arasında çarpıcı maliyet farkları olduğunu ortaya koymaktadır.

4.1. Bağlantı Elemanlarının Ekonomik Analizi

Bir montaj işleminin maliyeti; parça maliyeti, hazırlık süresi ve işlem süresinin toplamıdır. Vidalı bağlantılarda, vidanın kendisi ucuz olsa bile; deliğin delinmesi, dış açılması, vidanın yerine yerleştirilmesi ve torklanması süreçleri ciddi bir işçilik maliyeti yaratır. Buna karşılık, perçinleme veya presle birleştirme işlemleri çok daha hızlıdır ancak sökülebilirlik özelliğini kısıtlar.

Bralla'nın (1999) el kitabında sunduğu karşılaştırmalı analizlere göre; ideal bir DFA tasarımı, ayrıık bağlantı elemanlarını (vidalar, pullar, somunlar) tamamen ortadan kaldırmayı hedefler. Plastik veya sac metal parçalarda, malzemenin kendi esnekliğinden faydalanarak yapılan “Geçme Bağlantılar” (Snap-Fits), montaj süresini saniyeler mertebesine indirir.



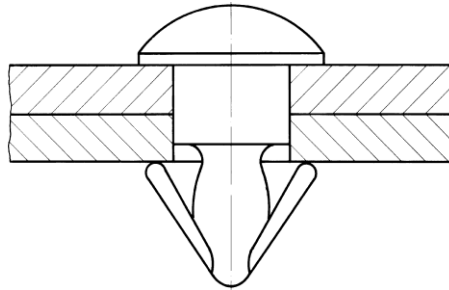
Şekil 7. Birleştirme yöntemlerinin yapısal karşılaştırması: İşçilik yoğun vidalı bağlantı (sol) ve montajı hızlı geçme bağlantı (sağ) (Bode, 1996).

4.2. Geçme Bağlantı (Snap-Fit) Tasarım Esasları

Plastik parça tasarımında “Snap-Fit” kullanımı, DFA’nın zirve noktasıdır. Ancak bu bağlantı türü, derinlemesine malzeme bilgisi ve hassas geometrik tasarım gerektirir. Yanlış tasarlanmış bir tırnak, montaj sırasında aşırı gerilme nedeniyle kırılabilir veya zamanla gevşeyerek işlevini yitirebilir.

Tasarımda dikkat edilmesi gereken en kritik parametreler; montaj kolaylığını belirleyen giriş açısı (α), parçanın yerinden çıkmamasını sağlayan tutma açısı (β) ve tırnağın ne kadar esneyeceğini belirleyen kilitlenme miktarıdır. Tasarımcı, tırnağın kök radyüsünü gerilme yığılmalarını önleyecek şekilde belirlemeli (genellikle $R \geq 0,6.t$) ve malzemenin izin verilen elastik deformasyon limitlerini aşmamalıdır.

Bağlantının karakteristiğini belirleyen temel unsur açılarıdır. Montaj işleminin operatör veya robot tarafından aşırı kuvvet uygulanmadan gerçekleştirilebilmesi için giriş açısının 25° ile 35° arasında seçilmesi önerilir (Bralla, 1999). Buna karşılık, bağlantının sökülebilirliği tutma açısına bağlıdır. Servis veya bakım amacıyla sökülmesi gereken parçalarda tutma açısı 45° ile 60° aralığında tutulmalı; buna karşın sökülmemesi gereken kalıcı montajlarda bu açı 90° ’ye yaklaştırılmalıdır. 90° ’lik dik bir açı, ters yönde kuvvet uygulandığında tırnağın kayarak açılmasını engeller ve kilitlenmeyi garanti altına alır.



Şekil 8. Plastik parçalarda konsol tipi geçme bağlantı (snap-fit) mekanizmasının kesit görünüşü ve kilitlenme (undercut) prensibi (Bode, 1996).

5. ENDÜSTRİ 4.0 VE MONTAJ TEKNOLOJİLERİNİN GELECEĞİ

Geleneksel DFA kuralları büyük ölçüde manuel montajın ergonomisi üzerine kuruluyken; günümüzün “Akıllı Fabrikalarında” üretim paradigması değişmiştir. Endüstri 4.0 ile birlikte “Montaj 4.0” kavramı literatüre girmiş ve tasarımcılardan yeni yetkinlikler talep etmeye başlamıştır.

5.1. İnsan-Robot İşbirliği İçin Tasarım

Geleneksel endüstriyel robotlar kafesler ardında çalışırken, yeni nesil “Collaborative Robots” (Kobotlar) operatörle omuz omuza çalışmaktadır. Michaelis vd. (2020) tarafından vurgulandığı üzere, HRC sistemlerinde parçaların robot tutucuları tarafından kolayca kavranabilmesi için paralel tutma yüzeylerine sahip olması şarttır. İnsan elinin tolere edebileceği karmaşık veya kaygan formlar, robotlar için büyük bir engeldir. Ayrıca, parçaların üzerindeki referans noktaları, robotun görüntü işleme sisteminin parçayı tanımasını kolaylaştıracak şekilde tasarlanmalıdır.

5.2. Dijital İkizler ve Simülasyon Destekli Montaj

Fiziksel prototip üretmeden önce, montaj hatlarının “Dijital İkizleri” oluşturularak sanal montaj doğrulamaları yapılmaktadır. Maruyama vd. (2021), dijital ikiz tabanlı simülasyonların, montaj sırasındaki çakışmaları ve ergonomik riskleri tasarım aşamasında tespit ettiğini belirtmektedir. Tasarımcılar, CAD verisini oluştururken bu simülasyon yazılımlarının gereksinim duyduğu montaj ilişkilerini ve kinematik kısıtları doğru tanımlamalıdır.

5.3. Döngüsel Ekonomi ve Söküm İçin Tasarım (DfD)

Geleceğin montaj hatları, aynı zamanda birer “demontaj” hattı olacaktır. Sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda, ürünlerin kullanım ömrü sonunda malzemelerine ayrıştırılabilmesi yasal bir zorunluluk haline gelmektedir (Baratta vd., 2025). Bu nedenle, yapıstırıcı gibi geri dönüşsüz birleştirme yöntemleri yerine; sökülebilir tırnaklar, standart vidalar veya “hafızalı polimerler” gibi ısıyla çözülebilen akıllı bağlantı elemanları tercih edilmelidir.

6. SONUÇ

Montaj Odaklı Tasarım (DFA), bir ürünün pazar başarısını doğrudan etkileyen stratejik bir mühendislik disiplindir. Tarihsel süreçte maliyet düşürme odaklı başlayan bu yaklaşım, günümüzde robotik, otomasyon ve sürdürülebilirlik parametrelerini de içine alarak genişlemiştir.

Bu bölümde detaylandırılan; parça sayısının azaltılması (Entegre Tasarım), geometrik düzenlemeler (Pah kırma, simetri) ve doğru birleştirme yöntemi seçimi, tasarımcıların refleks olarak uygulaması gereken temel prensiplerdir. Ancak başarılı bir DFA uygulaması için sadece kuralları bilmek yetmez; tasarımcının üretim sahasıyla sürekli iletişim halinde olması ve eş zamanlı

mühendislik kültürünü benimsemesi gerekir. Geleceğin başarılı ürünleri, sadece mükemmel çalışanlar değil; en az kaynakla, en hızlı şekilde, hatasız olarak üretilebilen ve ömrünü tamamladığında doğaya en az zarar vererek ayrıştırılabilen ürünler olacaktır.

KAYNAKLAR

- Baratta, A., Cimino, A., Gazzaneo, L., & Solina, V. (2025). Conceptual modeling for a simulation-based digital twin in human-robot collaboration. *Procedia Computer Science*.
- Beitz, W., & Küttner, K.-H. (1987). *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. Berlin, Almanya: Springer-Verlag.
- Bode, E. (1996). *Konstruktionsatlas* (6. Aufl.). Wiesbaden, Almanya: Springer Fachmedien.
- Boothroyd, G., & Dewhurst, P. (1983). *Design for assembly: A designer's handbook*. Wakefield, RI: Boothroyd Dewhurst Inc.
- Bralla, J. G. (1999). *Design for manufacturability handbook* (2. Baskı). New York, NY: McGraw-Hill.
- Dolgui, A., Sgarbossa, F., & Simonetto, M. (2022). Design and management of assembly systems 4.0: systematic literature review and research agenda. *International Journal of Production Research*, 60(1), 184-210.
- Maruyama, T., Ueshiba, T., Tada, M., & Suita, K. (2021). Digital twin-driven human robot collaboration using a digital human. *Sensors*, 21(22), 7682.
- Michaelis, J. E., Siebert-Evenstone, A., Shaffer, D. W., & Mutlu, B. (2020). Collaborative or simply uncaged? Understanding human-cobot interactions in automation. *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1-12). New York, NY: ACM.
- Pahl, G., & Beitz, W. (2021). *Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (9. Aufl.). Berlin, Almanya: Springer Vieweg.

BÖLÜM 21

Döngüsel Ekonomi Ekseninde Sürdürülebilir Ürün Tasarımı ve Geri Dönüşüm Stratejileri

Tuğçe Tezel¹ & Volkan Kovan²

¹ Doç. Dr. , Akdeniz Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü
ORCID: 0000-0003-0139-442X

² Prof. Dr., Akdeniz Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü
ORCID: 0000-0002-0599-525X

1. GİRİŞ

Endüstriyel üretim paradigmasının tarihsel ve teknolojik evrimi incelendiğinde, 18. yüzyıl Sanayi Devrimi'nin bir dönüm noktası olduğu görülmektedir. James Watt'ın buhar makinesini sanayiye entegre etmesiyle başlayan makineleşme süreci, insanlığa daha önce hayal bile edilemeyecek bir üretim kapasitesi sunmuştur. Ancak bu kapasite artışı, doğal kaynakların sonsuz, çevrenin ise sınırsız bir atık yutma kapasitesine sahip olduğu varsayımı üzerine kurulu bir ekonomik modeli de beraberinde getirmiştir. Literatürde “Doğrusal Ekonomi” olarak adlandırılan ve “Al-Yap-Kullan-At” (Take-Make-Use-Dispose) prensibine dayanan bu model, 20. yüzyıl boyunca küresel refah artışının motoru olmuştur. Hammadde doğadan çıkarılır, işlenerek ürüne dönüştürülür, kullanılır ve ömrünü tamamladığında ekonomik değerini yitirmiş bir atık olarak doğaya terk edilir. Ancak 21. yüzyılın ilk çeyreğinde hammadde rezervlerindeki kritik azalmalar, tedarik zinciri kırılganlıkları ve iklim krizinin somutlaşan etkileri, bu modelin artık teknik ve ekonomik olarak sürdürülebilir olmadığını kanıtlamıştır.

Günümüzde mühendislik tasarımı, tarihindeki en köklü dönüşümlerden birini yaşamaktadır. Geçmişte bir konstrüksiyonun başarısı; dayanım, maliyet ve üretilebilirlik gibi geleneksel parametrelerle ölçülürken, bugün bu denkleme “Döngüsel Ekonomi” dördüncü ve belki de en kritik boyut olarak eklenmiştir. Döngüsel ekonomi, termodinamik yasalarına benzer bir kapalılık ilkesiyle hareket eder: Atık kavramı, aslında bir tasarım hatasıdır. Bu yaklaşıma göre, ömrünü tamamlamış bir ürün çöp değil, işlenmiş, şekillendirilmiş ve sisteme geri kazandırılmayı bekleyen bir hammadde deposudur. Mesa ve Esparragoza (2021) tarafından vurgulandığı üzere, bu yeni paradigma, mühendislik eğitiminden başlayarak tüm tasarım süreçlerinin “Beşikten Mezara” değil, “Beşikten Beşiğe” (Cradle-to-Cradle) yaklaşımıyla yeniden kurgulanmasını zorunlu kılmaktadır.

Bu dönüşüm, sadece etik bir tercih veya kurumsal sosyal sorumluluk projesi değildir; aynı zamanda küresel ticaretin getirdiği bağlayıcı bir zorunluluktur. Özellikle Avrupa Birliği'nin devreye aldığı “Yeşil Mutabakat” ve buna bağlı “Eko-Tasarım Yönetmeliği”, ürünlerin küresel pazara giriş vizesi haline gelmiştir. Artık tasarımcılar ve üreticiler, bir ürünü tasarlarlarken sadece onun montaj hattındaki verimliliğini değil, 10 veya 20 yıl sonra kullanım ömrü bittiğinde nasıl demonte edileceğini, malzemelerinin nasıl ayrıştırılacağını da planlamak zorundadır. Rodriguez Romo vd. (2025) tarafından yapılan güncel çalışmalar, akıllı döngüsel sistemlerin kurulabilmesi için tasarım aşamasında alınan kararların, geri dönüşüm tesislerindeki ayırma teknolojilerinden çok daha belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır.

Nitekim yapılan araştırmalar, bir ürünün çevresel etkisinin yaklaşık %80'inin tasarım aşamasında belirlendiğini göstermektedir. Bu durum, tasarımcının omuzlarına üretim maliyeti sorumluluğunun ötesinde, çevresel maliyet

sorumluluğunu da yükler. Malzeme seçiminde yapılan bir hata -örneğin geri dönüştürülemez termoset kompozitlerin kullanımı veya metal insertlerin plastiğe kalıcı olarak gömülmesi- ürünün kaderini daha fabrikadan çıkmadan atık olarak mühürleyebilir. Dreier vd. (2025), ürün döngüselliğini artırmak için somut ve ölçülebilir döngüsel tasarım kriterlerinin geliştirilmesi gerektiğini belirtmekte ve tasarımcıları malzeme uyumluluğu konusunda uyarmaktadır. Pahl ve Beitz'in (2021) sistematik tasarım metodolojisinde "Recyclinggerechtes Gestalten" (Geri Dönüşüme Uygun Tasarım) olarak tanımladığı bu yaklaşım, ürün fonksiyonundan ödün vermeden malzeme çeşitliliğini azaltmayı ve demontajı kolaylaştırmayı hedefler.

Sürdürülebilir tasarım stratejileri, aynı zamanda Endüstri 4.0 ve dijitalleşme süreciyle de sıkı bir entegrasyon içerisindedir. Karim vd. (2025) ve Trevisan vd. (2025), dijital teknolojilerin döngüsel ekonomiye entegrasyonunun önemine dikkat çekmektedir. Geleneksel geri dönüşüm süreçlerinde en büyük sorun, atık haline gelen ürünün içeriğinin (malzeme türü, alaşımlar, katkı maddeleri) bilinmemesidir. Bu bilgi eksikliği, "Dijital Ürün Pasaportu" (Digital Product Passport - DPP) uygulamalarıyla aşılmaktadır. Ürünlerin içerdiği malzemeler, bakım geçmişi ve söküm talimatları dijital bir ikiz (Digital Twin) üzerinde saklanabilmekte; böylece ürün ömrünü tamamladığında geri dönüşüm tesisleri tarafından en verimli şekilde ayrıştırılabilmektedir. Bu sayede, malzemelerin değer kaybetmeden tekrar kullanıma girmesi mümkün hale gelmektedir.

Döngüsel ekonomiye geçiş süreci, teknolojik bir altyapı değişikliğinin ötesinde, mühendislik zihniyetinde köklü bir dönüşümü gerektirmektedir. Geleneksel tasarım yaklaşımında maliyet, hız ve performans göstergeleri net bir şekilde tanımlanmışken; döngüsel tasarımın başarısını ölçecek metrikler henüz tam anlamıyla standardize edilememiştir. Ancak literatürdeki son gelişmeler, tasarımcıların artık "Bu ürün ne kadar çevreci?" sorusuna soyut cevaplar vermek yerine; söküm indeksi, malzeme geri kazanım oranı ve döngüsellik katsayısı gibi sayısal verilerle yanıt vermesi gerektiğini göstermektedir. Yalın üretim prensiplerini döngüsel tasarımla birleştiren metodolojiler ve çok boyutlu değerlendirme çerçeveleri, tasarım sürecinin denetlenebilirliğini artırmaktadır.

Bu kitap bölümünün amacı; tarihsel kökenlerinden ve yasal zorunluluklardan yola çıkarak, döngüsel ekonomi prensiplerinin mekanik tasarıma nasıl entegre edileceğini kapsamlı bir şekilde incelemektir. Bölüm boyunca; ürün yaşam döngüsü yönetimi, söküm için tasarım (Design for Disassembly - DfD) prensipleri, malzeme seçiminde dikkat edilmesi gereken uyumluluk kriterleri ve yüzey işlemlerinin geri dönüşüme etkileri ele alınacaktır. Çalışmanın ilerleyen kısımlarında, özellikle Bode'nin (1996) Konstruktionsatlas çalışmasındaki pratik tasarım kılavuzları ve Pahl/Beitz'in (2021) sistematik yaklaşımı, güncel literatür verileriyle desteklenerek sunulacaktır. Bu stratejiler, sadece çevresel sürdürülebilirliği sağlamakla kalmayıp, hammadde verimliliği yoluyla ekonomik

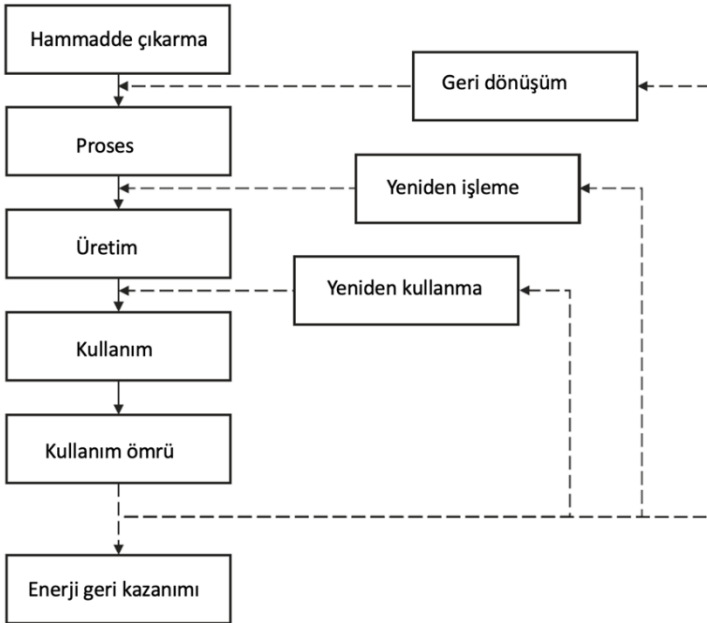
rekabet gücünü de artırmayı hedefleyen modern bir mühendislik vizyonunu temsil etmektedir.

2. SÜRDÜRÜLEBİLİR TASARIMIN TEMELLERİ VE ÜRÜN YAŞAM DÖNGÜSÜ

Geleneksel mühendislik yaklaşımında tasarımcıların odak noktası büyük ölçüde üretim maliyeti ve kullanım performansı ile sınırlıdır. Ancak sürdürülebilir tasarım (Eco-Design), ürünü izole bir nesne olarak değil, zamana yayılmış dinamik bir süreçler bütünü olarak ele almayı gerektirir. Bu süreç, hammadde tedarikinden başlayıp üretim, dağıtım, kullanım ve nihayetinde kullanım ömrü sonu bertarafına kadar uzanan ürün yaşam döngüsüdür. Pahl ve Beitz (2021), modern konstrüksiyon biliminde tasarımcının asli görevinin, bu döngüdeki malzeme ve enerji akışını kapalı bir devre haline getirmek olduğunu vurgular.

2.1. Malzeme Döngüsü ve Geri Kazanım Hiyerarşisi

Doğrusal ekonomide hammadde, büyük miktarda enerji harcanarak ürüne dönüştürülür ve kullanım sonunda bu enerji kaybedilerek ürün atığa dönüşür. Döngüsel tasarımda ise amaç, malzemeye yüklenen bu enerjiyi (Gömülü Enerji: Embodied Energy) ve katma değeri mümkün olduğu kadar uzun süre sistem içinde tutmaktır. Bu bağlamda, Pahl ve Beitz tarafından geliştirilen malzeme döngüsü modeli, tasarımcıya yol gösterici bir harita sunar.



Şekil 1. Teknik ürünler için malzeme döngüsü ve geri kazanım aşamaları: Hammaddeden geri dönüşüme kapalı devre akışı (Pahl ve Beitz, 2021).

Şekil 1’de şematize edildiği üzere, ideal bir döngüde atık yoktur; sadece form değiştirmiş kaynaklar vardır. Tasarımcı, ürünün kullanım ömrü dolduğunda hangi yola gireceğini en baştan belirlemelidir. Bu yollar, çevresel verimlilik ve ekonomik değer sırasına göre şu şekilde hiyerarşize edilir ve her biri farklı tasarım gereksinimleri doğurur:

1. **Yeniden Kullanım (Reuse):** Ürünün temizlenip, küçük bakımlarla aynı amaçla tekrar kullanılmasıdır. En az enerji gerektiren, en çevreci seçenektir. Tasarımcı açısından bu strateji; ürünün aşınmaya dayanıklı yüzeylere sahip olmasını, kolay temizlenebilir geometride tasarlanmasını ve modüler yapıda olmasını gerektirir (Örneğin: Cam şişeler, yeniden doldurulabilir endüstriyel variller).
2. **Yenileme (Remanufacturing):** Ürünün sökülmesi, aşınan kritik parçaların değiştirilmesi ve sıfır ürün garantisiyle tekrar montaj hattına sokulmasıdır. Bu strateji, otomotiv motorları, havacılık bileşenleri veya fotokopi makineleri gibi yüksek katma değerli ürünlerde yaygındır. Tasarımcı, ürünün ana gövdesini (karkas) sonsuz ömürlü olacak şekilde tasarlarırken, aşınan parçaları (rulman, conta, dişli) kolay değiştirilebilir modüller halinde kurgulamalıdır.
3. **Geri Dönüşüm (Recycling):** Ürünün malzemelerine (metal, plastik vb.) ayrıştırılması ve bu malzemelerin eritilerek/kırılarak ikincil hammaddeye dönüştürülmesidir. Bu süreç enerji gerektirir ve malzeme kalitesinde düşüşe neden olabilir. Tasarımcının buradaki görevi, malzeme çeşitliliğini azaltmak ve ayrıştırmayı kolaylaştırmaktır.
4. **Enerji Geri Kazanımı (Energy Recovery):** Malzemenin yakılarak ısı veya elektrik enerjisine dönüştürülmesidir. Sadece diğer seçenekler teknik olarak mümkün olmadığında (örneğin çok kirli veya kompozit malzemeler) tercih edilmelidir.

2.2. Tasarımcının Sorumluluğu: Kullanım Ömrü Sonunu Planlamak

Bir ürünün geri dönüştürülebilirliği, geri dönüşüm tesisinin teknolojisinden ziyade, o ürünün mimarisine ve tasarımcının kaleminin ucuna bağlıdır. Eğer bir tasarımcı, maliyeti düşürmek adına sökülmesi imkânsız bir bağlantı yöntemi (örneğin ultrasonik kaynak veya perçin) seçerse; o ürünün “Yenileme” veya “Geri Dönüşüm” basamaklarına geçişini fiziksel olarak engellemiş olur. Bu durumda ürün, tasarım hatası nedeniyle zorunlu olarak atık sahasına gönderilir.

Bu nedenle, sürdürülebilir bir tasarım için temel prensip şudur: Birleştirdiğin gibi ayırabilmelisin. Dreier vd. (2025) tarafından belirtildiği üzere, tasarım aşamasında belirlenen bağlantı sökülebilirliği (detachability), döngüsel ekonominin anahtarıdır. Tasarımcı, konstrüksiyon aşamasında hazırladığı

istekler listesine, fonksiyonel şartların yanına mutlaka sökülme ve geri kazanım şartlarını da eklemelidir.

2.3. Döngüsel Tasarım Göstergeleri ve Ölçülebilirlik

Mühendislikte “ölçemediğinizi yönetemezsiniz” ilkesi geçerlidir. Geleneksel tasarımda bir ürünün başarısı mukavemet, ağırlık veya maliyet analizleriyle sayısal olarak doğrulanabilirken; sürdürülebilirlik uzun süre soyut bir kavram olarak kalmıştır. Ancak güncel literatürde bu durum değişmektedir. Dreier vd. (2025) ve Mesa & Esparragoza (2021) tarafından sunulan çalışmalar, tasarımın döngüsellikini ölçmek için somut göstergeler tanımlamaktadır:

- **Söküm İndeksi:** Ürünün bileşenlerine ayrılması için gereken sürenin ve işlem sayısının standartlara (ISO 20887) göre puanlanmasıdır.
- **Malzeme Döngüsellik Göstergesi:** Üründe kullanılan geri dönüştürülmüş hammadde oranı ile ürünün kullanım ömrü sonunda geri kazanılabilir malzeme oranını formülize eden bir metriktir.
- **Kritik Hammadde Oranı:** Ürünün tedarik riski taşıyan veya toksik içerik barındıran malzeme yüzdesidir.

Tasarımcılar, CAD programları ve dijital ikizler aracılığıyla bu metrikleri tasarımın henüz erken aşamalarında hesaplayabilmekte ve “Eko-Tasarım” kararlarını sayısal verilere dayandırabilmektedir (Karim vd., 2025). Bu yaklaşım, sürdürülebilirliği bir temenni olmaktan çıkarıp, optimize edilebilir bir mühendislik parametresine dönüştürür.

3. MALZEME SEÇİMİ VE AYRIŞTIRMA STRATEJİLERİ

Bir ürünün teknik ve ekonomik başarısı, büyük ölçüde malzeme seçimi aşamasında belirlenir. Geleneksel tasarım yaklaşımında malzeme seçimi; mekanik dayanım, korozyon direnci, yoğunluk ve maliyet gibi performans parametrelerinin optimizasyonuna dayanır. Ancak döngüsel ekonomi perspektifinden bakıldığında, bu parametrelerin yanına “Geri Dönüştürülebilirlik” ve “Ayrıştırılabilirlik” kriterlerinin eklenmesi zorunludur. Çünkü geri dönüşüm sürecinin termodinamik verimliliği, atık akışının saflığına doğrudan bağlıdır. Birbiriyle karışmış, ayrılamayan veya kimyasal olarak uyumsuz malzemeler, geri dönüşüm tesislerinde işlenemeyerek ya enerji geri kazanımına (yakma) gönderilmekte ya da değer kaybı işlemine tabi tutularak düşük nitelikli ürünlere dönüştürülmektedir.

Pahl ve Beitz (2021), sürdürülebilir konstrüksiyonun temel amacının, malzeme döngülerindeki entropiyi (düzensizliği) minimize etmek olduğunu savunur. Karmaşık kompozitler, lamine yapılar ve çok katmanlı kaplamalar, teknik performansı artırsa da malzeme entropisini yükselterek geri kazanımı imkansızlaştırabilir. Bu nedenle tasarımcı, malzeme seçiminde performans/döngüsellik dengesini gözetmekle yükümlüdür.

3.1. Malzeme Çeşitliliğinin Azaltılması ve “Mono-Malzeme” Stratejisi

Geri dönüşüm tesislerindeki en büyük maliyet kalemi, farklı polimer ve metallerin birbirinden ayrıştırılması işlemidir. Bu maliyeti düşürmenin en etkili yolu, ürün genelinde kullanılan malzeme çeşitliliğini minimize etmek, ideal senaryoda ise “Mono-Malzeme” (Monomaterial) stratejisine geçmektir.

Mono-malzeme stratejisi, bir ürünün veya alt montaj grubunun (örneğin bir otomobil tamponu veya elektrik süpürgesi gövdesinin) tamamının aynı polimer ailesinden (örneğin sadece Polipropilen - PP) üretilmesini öngörür. Bode (1996) tarafından belirtildiği üzere, eğer tasarımda farklı mekanik özelliklere (örneğin biri sert, diğeri esnek) ihtiyaç duyuluyorsa; tasarımcı farklı kimyasal yapılara sahip plastikler (PP ve ABS gibi) kullanmak yerine, aynı polimerin farklı modifikasyonlarını (örneğin talk katkılı PP ve elastomer modifiyeli PP) tercih etmelidir.

Bu yaklaşımın sağladığı avantajlar, güncel literatürde şu şekilde özetlenmektedir:

- **Ayrırma İşleminin Eliminasyonu:** Ürün parçalandığında, ortaya çıkan parçacıklar tek tip olduğu için, yoğunluk farkı veya optik ayırma gibi pahalı proseslere gerek kalmadan doğrudan eritilebilir.
- **Yüksek Hammadde Kalitesi:** Yabancı madde karışımı (kontaminasyon) riski azaldığı için, geri kazanılan ikincil hammadde orijinal malzemeye yakın özellikler sergiler.
- **Stok ve Lojistik Verimliliği:** Üretim aşamasında daha az hammadde kodu ile çalışılması, tedarik zinciri yönetimini basitleştirir.

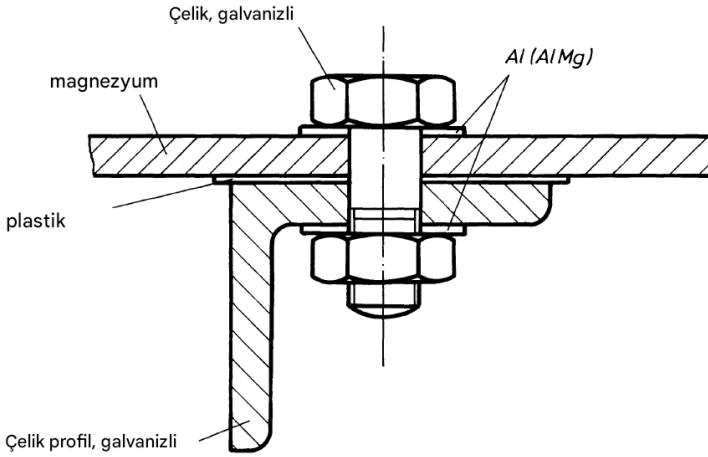
Ancak mono-malzeme stratejisinin uygulanamadığı durumlarda, tasarımcı geri dönüşüm uyumluluk matrislerini kullanmalıdır. Örneğin, Polietilen (PE) ve Polipropilen (PP) belirli oranlarda birbirini tolere edebilirken; PVC’nin (Polivinil Klorür) PET (Polietilen Tereftalat) akışına karışması, tüm geri dönüşüm partisini bozacak asidik gazların çıkışına neden olur. Bu nedenle tasarımcı, birbiriyle uyumsuz malzemelerin aynı montaj grubunda kalıcı olarak birleştirilmesinden kaçınmalıdır.

3.2. Çok Bileşenli Yapılarda Ayrıştırma ve Malzeme Saflığı

Mekanik tasarımda sıkça karşılaşılan bir zorluk, farklı fiziksel özelliklere sahip malzemelerin (örneğin mukavemet için çelik, hafiflik için magnezyum ve yalıtım için plastik) aynı montaj grubunda kullanılma zorunluluğudur. Geleneksel yaklaşımda bu malzemeler, üretim kolaylığı adına yapıştırma, perçinleme veya kalıp içine gömme yöntemleriyle kalıcı olarak birleştirilir. Ancak bu durum, geri dönüşüm sürecinde malzeme kirliliğine yol açar; ayrıştırılamayan malzemeler birbirinin kimyasal yapısını bozarak hurda değerini yok eder.

Sürdürülebilir tasarımda temel kural, malzeme saflığının korunmasıdır. Bu nedenle, farklı malzeme grupları birbirine kalıcı olarak değil, sökülebilir arayüzlerle bağlanmalıdır. Bode (1996) tarafından önerilen yöntem, malzemelerin fiziksel olarak temas etse bile, birleştirme elemanının (cıvata, klips vb.) sökülmesiyle serbest kalacak şekilde tasarlanmasıdır.

Şekil 2’de görüldüğü üzere, bu tür bir sandviç montaj yapısı, ürün ömrünü tamamladığında basit bir anahtar hamlesiyle tüm katmanların (Çelik, Alüminyum, Plastik) kendi geri dönüşüm kutularına %100 saflıkla gönderilmesine olanak tanır. Ayrıca bu yöntem, galvanik korozyonu önlemek için kullanılan yalıtkan pulların da kolayca değiştirilmesini (bakım) sağlar.



Şekil 2. Malzeme saflığını korumak için ayrıştırılabilir tasarım prensibi: Farklı malzemelerin (Çelik, Magnezyum, Plastik) sökülebilir bağlantı elemanları ile montajı ve malzeme işaretleme (Bode, 1996).

3.3. Kritik ve Toksik Malzemelerin Yönetimi ve Yasal Kısıtlamalar

Sürdürülebilir malzeme seçimi, sadece neyin kullanılacağını değil, aynı zamanda neyin kullanılmayacağını belirlemeyi de kapsar. Avrupa Birliği’nin RoHS (Tehlikeli Maddelerin Kısıtlanması) ve REACH (Kimyasalların Kaydı, Değerlendirilmesi, İzni ve Kısıtlanması) direktifleri; kurşun, cıva, kadmiyum ve altı değerlikli krom gibi toksik maddelerin kullanımını yasaklamıştır. Tasarımcı, malzeme seçim matrisinde sadece akma dayanımı veya yoğunluk gibi mekanik özellikleri değil, aynı zamanda malzemenin toksisite potansiyelini de bir eleme kriteri olarak değerlendirmek zorundadır.

Ayrıca, modern teknolojinin vazgeçilmezi olan ancak tedarik riski taşıyan kritik hammaddeler özel bir yönetim stratejisi gerektirir. Özellikle elektrik

motorlarında kullanılan mıknatıslar veya elektronik kartlardaki nadir toprak elementleri, ürünün geri kalanından (çelik gövde veya plastik kapak) kolayca ayrılabilir modüler bir yapıda tasarlanmalıdır. Literatürdeki güncel çalışmalar, bu tür kritik bileşenlerin dijital malzeme pasaportu ile etiketlenmesi ve ürün üzerinde kolay erişilebilir noktalara yerleştirilmesinin, geri kazanım tesislerindeki ayırma verimliliğini ve malzeme döngüselliğini önemli ölçüde artırdığını ortaya koymaktadır (Karim vd., 2025; Rodriguez Romo vd., 2025). Tasarımcı, bu değerli malzemeleri “kurbanlık” bir yapı içine hapsedmemeli, aksine onların bir sonraki ürün döngüsüne “VIP yolcu” olarak geçişini sağlayacak sökülüm senaryolarını kurgulamalıdır.

4. SÖKÜM İÇİN TASARIM (DESIGN FOR DISASSEMBLY - DfD)

Döngüsel ekonominin başarısı, ürünlerin kullanım ömrü sonunda bileşenlerine ne kadar hızlı ve hasarsız ayrılabilmesine bağlıdır. Geri dönüşüm tesislerinde zaman en kritik maliyet kalemidir. Eğer bir ürünün değerli bileşenlerine (örneğin elektrik motoru veya batarya paketi) ulaşmak için gereken işçilik maliyeti, geri kazanılan malzemenin piyasa değerini aşıyorsa; o ürün ekonomik olarak geri dönüştürülemez kabul edilir ve genellikle parçalayıcıya atılarak düşük değerli hurdaya dönüştürülür. Bu nedenle, sökülüm için tasarım, sadece çevresel bir strateji değil, geri kazanım sürecinin ekonomik fizibilitesini belirleyen temel mühendislik disiplini.

Pahl ve Beitz (2021), sökülüm işlemini montajın tersine çevrilmiş hali olarak tanımlasa da pratikte sökülüm çok daha kaotik şartlarda gerçekleşir. Ürünler korozyona uğramış, deforme olmuş veya kirlenmiş olabilir. Dolayısıyla tasarımcı, ideal laboratuvar koşullarını değil, sahadaki zorlu sökülüm koşullarını öngörerek tasarım yapmalıdır. Dreier vd. (2025) tarafından sunulan analizler, sökülüm süresindeki her %10'luk azalmanın, geri kazanım kârlılığını %15 oranında artırdığını göstermektedir.

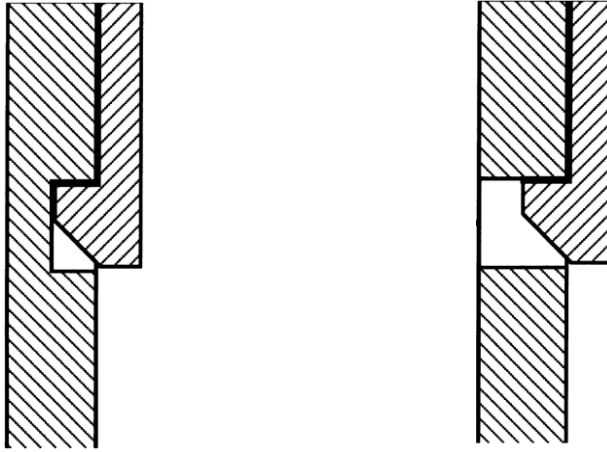
4.1. Bağlantı Tekniklerinin Sınıflandırılması ve Tahribatsız Sökülüm

Bir ürünün sökülebilirliğini belirleyen en temel unsur, parçaları bir arada tutan bağlantı elemanlarının karakteristiğidir. Bode (1996) ve VDI 2243 standardı, bağlantı tekniklerini sökülebilirlik açısından üç ana kategoride inceler:

- **Şekil Bağı (Form-Fit):** Parçaların geometrik olarak birbirine kenetlenmesidir (Örneğin, geçme bağlantılar, pimler). Genellikle en kolay sökülen ve tekrar kullanılabilen bağlantı türüdür.
- **Kuvvet Bağı (Force-Fit):** Sürtünme kuvvetiyle sağlanan bağlantıdır (Örneğin, pres geçmeler).
- **Malzeme Bağı (Material-Fit):** Moleküler düzeyde birleşmedir (Örneğin, kaynak, lehim, yapıştırma). Geri dönüşümde parçanın hasar görmesine neden olur.

Sürdürülebilir tasarımda hedef, tahribatsız sökümdür. Yapıştırma veya perçinleme gibi yöntemler, söküm sırasında birleşme noktalarının kırılmasını veya kesilmesini gerektirir; bu da parçanın "Yeniden Kullanım" (Reuse) değerini yok eder. Buna karşılık, vida veya geçme bağlantılar, elastik deformasyon sınırları içinde kalarak parçaların hasarsız ayrılmasına olanak tanır.

Şekil 3'te şematize edildiği üzere, doğru tasarlanmış bir sökülebilir bağlantı, demontaj kuvveti uygulandığında (ok yönünde) esneyerek açılır ve işlem bittiğinde her iki parça da orijinal formunu koruyarak yeni bir döngüye girmeye hazır hale gelir.

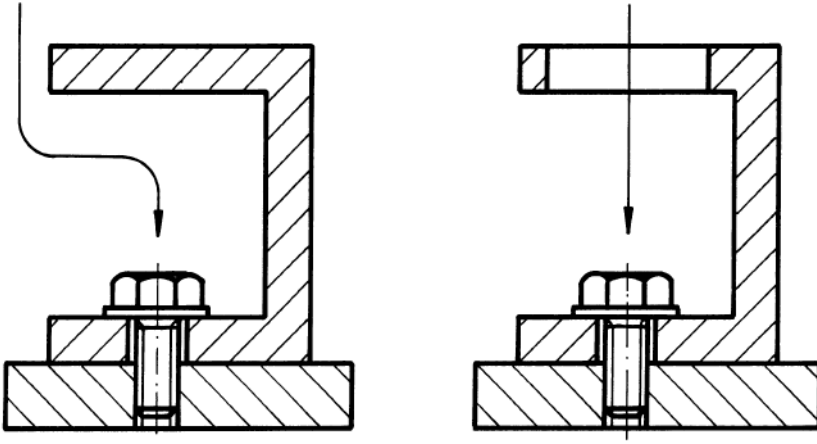


Şekil 3. Tahribatsız sökümler prensibi: Elastik şekil bağı (form-fit) kullanılarak parçaların ve bağlantı elemanlarının zarar görmeden ayrıştırılması (Bode, 1996).

4.2. Söküm Mimarisi ve Erişim Kolaylığı

Bir ürünün sökülebilirliği, sadece bağlantı elemanının türüne değil, aynı zamanda o elemanın ürün mimarisi içindeki konumuna ve erişilebilirliğine bağlıdır. Geri dönüşüm tesislerinde operatörler veya robotik söküm sistemleri, bağlantı noktalarını doğrudan görebilmeli ve standart el aletleriyle ulaşabilmelidir.

Tasarımcılar genellikle montaj sırasını düşünürken, parçanın yapısal elemanlarının (duvarlar, flanşlar, kapaklar) söküm aletinin yolunu kapatabileceğini gözden geçirir. Bode (1996), bu tür durumlarda yapısal erişim delikleri açılmasını önerir. Eğer bir bağlantı elemanı, bir profilin veya kapağın altında kalıyorsa; üstteki parçaya aletin geçebileceği çapta bir delik açmak, söküm işleminin kör nokta sorununu ortadan kaldırır ve dikey ekseninde hızlı müdahaleye imkân tanır.



Şekil 4. Söküm verimliliğini artıran geometrik erişim çözümü: Erişim engeli yaratan kapalı yapı (sol) ve söküm aleti için erişim deliği (access hole) oluşturulmuş tasarım (sağ) (Bode, 1996).

Şekil 4’te görüldüğü üzere, basit bir geometrik düzenleme (delik açma), söküm aletinin açılı veya özel aparatlarla değil, standart ve hızlı bir şekilde kullanılmasını sağlar. Bu da söküm süresini ve maliyetini doğrudan düşürür.

4.3. Gelecek Vizyonu: Aktif Söküm ve Robotik Sistemler

Söküm için tasarım (DfD) prensipleri her ne kadar süreci hızlandırırsa da, manuel söküm işlemleri yüksek işçilik maliyetleri nedeniyle endüstriyel ölçekte hala ekonomik bir darboğaz oluşturmaktadır. Bu sorunu aşmak için araştırmalar, insan müdahalesini minimize eden veya tamamen ortadan kaldıran akıllı söküm teknolojilerine odaklanmıştır.

Bu alandaki en yenilikçi yaklaşım, “Aktif Söküm” (Active Disassembly using Smart Materials - ADSM) teknolojisidir. Bu yöntemde, bağlantı elemanları (tırnaklar, vidalar veya segmanlar); şekil hafızalı alaşımlar veya şekil hafızalı polimerler gibi akıllı malzemelerden üretilir. Ürün kullanım ömrünü tamamladığında, belirli bir tetikleyiciye (örneğin 120°C sıcaklık, manyetik alan veya mikrodalga) maruz bırakılır. Bu tetikleyici, bağlantı elemanlarının şekil değiştirerek (örneğin tırnağın açılması veya vidanın çapının küçülmesi) kendiliğinden serbest kalmasını sağlar. Böylece binlerce ürün, tek bir işlemle ve saniyeler içinde bileşenlerine ayrılabilir.

Diğer taraftan, Endüstri 4.0 ve Yapay Zeka (AI) entegrasyonu, robotik söküm sistemlerini mümkün kılmaktadır. Geleneksel otomasyon sadece standart ürünleri sökebilirken; görüntü işleme ve makine öğrenmesi ile donatılmış yeni nesil robotlar, hasarlı veya deforme olmuş ürünleri tanıyabilmekte ve en uygun söküm stratejisini otonom olarak belirleyebilmektedir. Karim vd. (2025)

tarafından belirtildiği üzere, robotların ürün üzerindeki bağlantı noktalarını algılayabilmesi için tasarımcıların bu noktaları yüksek kontrastlı renklerle işaretlemesi veya QR kodlarla tanımlaması gerekmektedir. Geleceğin geri dönüşüm tesisleri, insan operatörlerin değil; ürünlerle dijital olarak haberleşen ve onları moleküler düzeyde ayırtıran otonom sistemlerin sahası olacaktır.

5. SONUÇ

Döngüsel Ekonomi ekseninde sürdürülebilir ürün tasarımı, modern mühendislik disiplininin en dinamik ve stratejik alanlarından biri haline gelmiştir. Bu bölümde detaylandırılan; geri kazanım hiyerarşisi, malzeme uyumluluğu ve söküm için tasarım (DfD) prensipleri, sadece çevresel regülasyonlara uyum sağlamak için değil, aynı zamanda hammadde verimliliğini artırarak ekonomik rekabet gücünü korumak için de hayati öneme sahiptir.

Pahl ve Beitz'in (2021) "Yaşam Döngüsü Odaklı Tasarım" yaklaşımı ile Bode'nin (1996) pratik "Konstrüksiyon Kılavuzları" birleştirildiğinde, tasarımcının yol haritası netleşmektedir:

1. **Azalt:** Malzeme çeşitliliğini ve birleştirme karmaşıklığını minimize et.
2. **Ayr:** Farklı malzemeleri (özellikle metal ve plastiği) sökülebilir bağlantılarla birleştir.
3. **Tanımla:** Malzemeleri ve söküm noktalarını dijital veya fiziksel olarak işaretle.

Geleceğin başarılı ürünleri, sadece performanslarıyla değil, döngüsel zekalarıyla da ölçülecektir. Dijital ürün pasaportu ve yapay zeka destekli söküm teknolojileri, bu sürecin hızlandırıcısı olacaktır. Ancak teknolojiden öte, asıl dönüşüm mühendislik etiğinde yaşanmalıdır. Tasarımcı, kâğıt üzerine çizdiği her çizginin, yıllar sonra doğada bırakacağı izden sorumlu olduğunu bilerek hareket etmelidir. Sürdürülebilirlik, artık bir ek özellik değil, iyi mühendisliğin varsayılan ayarıdır.

KAYNAKLAR

- Baratta, A., Cimino, A., Gazzaneo, L., & Solina, V. (2025). Conceptual modeling for a simulation-based digital twin in human-robot collaboration. *Procedia Computer Science*.
- Bode, E. (1996). Konstruktionsatlas (6. Aufl.). Wiesbaden, Almanya: Springer Fachmedien.
- Dreier, J., Perau, S., Hoepfner, G., & Jacobs, G. (2025). A framework for assessing and enhancing product circularity by translating circular design criteria into measurable requirements. *Sustainable Production and Consumption*.
- Karim, R., Waaje, A., & Roshid, M.M. (2025). Digital circular economy for attaining sustainable development goals: Technologies for global sustainability. *Effects of Digitalization and Circular Economy on Sustainable Policy*.
- Mesa, J.A., & Esparragoza, I. (2021). Towards the implementation of Circular Economy in Engineering Education: A systematic review. *Proceedings - Frontiers in Education Conference (FIE)*.
- Pahl, G., & Beitz, W. (2021). Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung (9. Aufl.). Berlin, Almanya: Springer Vieweg.
- Rodriguez Romo, M.F., Siva, V., Papakostas, N., & Hargaden, V. (2025). Circular economy and digital technologies: A research agenda for intelligent circular systems. *Resources, Conservation and Recycling Advances*.
- Trevisan, A.H., et al. (2025). Circular economy and digital technologies: A review of the current research streams. *Sustainable Production and Consumption*.

BÖLÜM 22

Derin Öğrenme Tabanlı Kenar Tespit Yöntemleri

Selami Parmaksızoğlu¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Antalya Bilim Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Pilotaj Bölümü, Antalya, ORCID: 0009-0001-2763-4156

1. KENAR TESPİT YÖNTEMLERİNE GENEL BİR BAKIŞ

Kenar tespiti, görüntü işleme ve bilgisayarlı görü alanlarında 50 yılı aşkın süredir önemli bir sorun olmaya devam etmektedir (Basu, 2002; Ziou & Tabbone, 1998). Görüntü işlemede kenar; gri tonlamalı bir görüntü düzleminde piksel yoğunluğunun sürekliliğini yitirdiği, keskin değişimlerin veya matematiksel süreksizliklerin meydana geldiği bölgeler olarak tanımlanır. Kenar tespiti süreci, sahnedeki nesnelerin geometrik ve yapısal özelliklerini korurken, işlenecek veri miktarını optimize ederek azaltan kritik bir ön işlemdir. Bu yöntem nesne tanıma algoritmalarına kolayca entegre edilebilmektedir (Basu, 2002). Tarihsel gelişim süreci incelendiğinde, kenar tespiti yöntemleri temel olarak dört ana kategoride sınıflandırılabilir: Geleneksel (Klasik) Yöntemler, Gaussian Tabanlı Yöntemler, Derin Öğrenme (DL) Öncesi Öğrenme Tabanlı Yaklaşımlar ve günümüzün standardını oluşturan Derin Öğrenme Tabanlı Yöntemler.

Geleneksel yöntemler, yerel gradyan operatörlerine dayanmıştır; bunlar arasında Sobel ve Prewitt dedektörleri gibi ilk operatörler bulunmaktadır (Ziou & Tabbone, 1998). Ancak, görüntü farklılaştırma süreçleri gürültü de dahil olmak üzere tüm yüksek frekanslı bileşenleri yükselttiğinden, bu erken operatörler gürültüye karşı hassas ve bulanık kenarlarda zayıf performans sergilemektedir. Bu erken dönem operatörlerin gürültü hassasiyetini aşmak amacıyla, ilerleyen yıllarda Gaussian filtreleme tabanlı çok ölçekli yaklaşımlar (Marr-Hildreth, Canny) geliştirilmiş ve kenar tespitinde uzun süre endüstri standardı olarak kabul görmüştür (Basu, 2002; Canny, 1986).

Derin öğrenme devriminden önce, bu sınırlamaları aşmak için öğrenme tabanlı yaklaşımlar ortaya çıkmıştır. Bu yöntemler, yerel görüntü yamalarındaki doğal yapıdan (düz çizgiler veya T-kavşakları gibi) yararlanmak için tasarlanmıştır (Dollár & Zitnick, 2015). Dollár ve Zitnick (2015) tarafından önerilen Yapılandırılmış Ormanlar (Structured Forests - SE), yapılandırılmış öğrenme çerçevesini kullanarak yerel segmentasyon maskelerini tahmin etmiş ve bu sayede gerçek zamanlı performansa (real-time performance) ulaşmıştır. Ancak bu DL öncesi öğrenme tabanlı yaklaşımlar, el yapımı (hand-crafted) özelliklere bağımlı olmaları ve derin öğrenme modellerinin sağladığı otomatik hiyerarşik özellik öğrenme yeteneğinden yoksun olmaları nedeniyle sınırlandırılmış başarımlara sahiptirler (Dollár & Zitnick, 2015; Xie & Tu, 2015).

Derin Öğrenme Tabanlı Kenar Tespit Yöntemleri, Convolutional Neural Networks (CNN) 'ler ile birlikte kullanılarak oluşturulan DCNN, otomatik hiyerarşik özellik öğrenmenin önemine odaklanarak alanda büyük bir ilerleme kaydetmiştir (Xie & Tu, 2015). Bu DCNN'ler, derin katmanların semantik ve nesne düzeyinde bilgiler, sık katmanların ise ince ayrıntılar ve kesin konumlandırma ipuçlarını yakalama yeteneği sayesinde (Liu et al., 2019),

geleneksel yöntemlerin ötesine geçmiştir. Temel DL mimarileri arasında, Holistically-Nested Edge Detection (HED), tam evrişimli ağları ve derin denetimi (deep supervision) kullanarak çok seviyeli özellikleri bütünsel olarak öğrenmiştir (Xie & Tu, 2015). Sonralarda Richer Convolutional Features (RCF), VGG16'daki tüm evrişim katmanlarından elde edilen özellikleri birleştirerek daha zengin temsiller sunmuştur (Liu et al., 2017). Bi-Directional Cascade Network (BDCN) ise, derinleşmek yerine, katmana özel denetim ve Ölçek Geliştirme Modülü (SEM) kullanarak verimlilik ve ölçek hassasiyetini artırmayı amaçlamıştır (He et al., 2019). En son gelişmelerde, Transformer mimarileri (örneğin EDTER) global bağlamı ve lokal detayları eş zamanlı olarak yakalamak için entegre edilmiştir. DL tabanlı yöntemler bu sayede günümüzde yüksek doğruluk ve çıkarım verimliliği açısından geleneksel yöntemlerin çok ilerisine geçmiştir (Pu et al., 2022).

2. GELENEKSEL (KLASİK) YÖNTEMLER

Geleneksel kenar tespiti yöntemleri, pikseller arasındaki yoğunluk farklarını analiz eden yerel gradyan operatörleri üzerine kurulmuştur. Bu alandaki en erken yaklaşımlar arasında Sobel ve Prewitt dedektörleri yer almaktadır. Ancak bu operatörler yalnızca belirli yönelimlere sahip kenarları tespit edebilmekte ve kenarlar bulanık veya gürültülü olduğunda zayıf performans sergilemektedir (Basu, 2002).

Geleneksel yaklaşımlar, görüntü farklılaştırmaya dayalı süreçler olmasına rağmen bu süreçler gürültü de dahil olmak üzere tüm yüksek frekanslı bileşenleri yükselttiği için mutlaka bir tür yumuşatma gerekmektedir. Yoğunluk geçişleri keskin olduğu için uygulanan herhangi bir doğrusal filtreleme, bu önemli geçişleri de kaçınılmaz olarak bulanıklaştırma riski taşımaktadır (Meer & Georgescu, 2001). Bu temel ikilemi çözmek amacıyla Marr ve Hildreth (1980) tarafından önerilen Gaussian filtresi, kenar tespitinde açık ara en yaygın kullanılan yumuşatma filtresi olmuştur. Gaussian filtresinin önemi, uzamsal ve frekans alanlarında eşzamanlı olarak yerelleştirme hedefleri arasında en iyi dengeyi sağlaması gibi önemli özelliklerinden kaynaklanmaktadır (Basu, 2002).

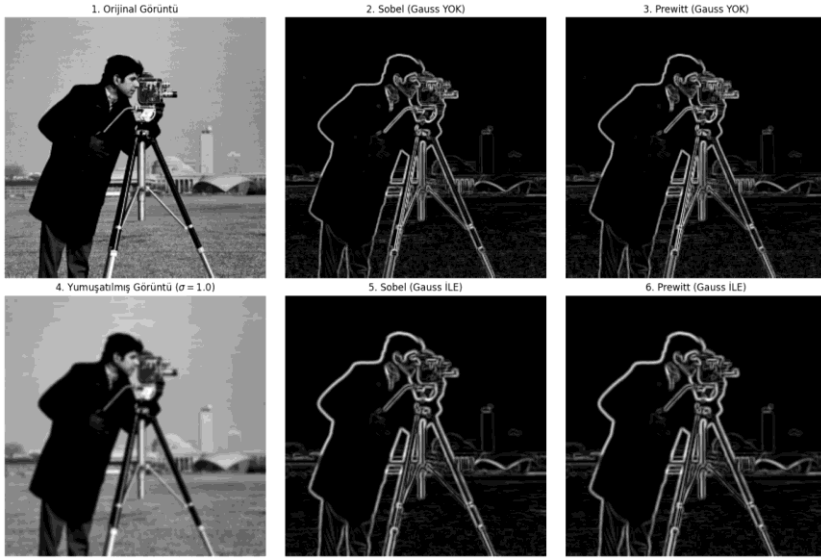
3. GAUSSİAN TABANLI YÖNTEMLER

Gaussian Tabanlı Yöntemler, gradyan temelli klasik operatörlerin gürültüye karşı hassasiyetini gidermek amacıyla geliştirilmiş ve modern kenar tespitinin temelini oluşturmuştur. Bu yöntemler, türev alma işlemi sırasında ortaya çıkan yüksek frekanslı gürültü bileşenlerini bastırmada kritik bir rol oynar. (Basu, 2002; Ziou & Tabbone, 1998).

3.1. Yumuşatma İhtiyacı ve Gaussian Filtresinin Rolü

Geleneksel kenar tespiti yöntemleri genellikle yerel gradyan operatörlerine dayanmaktadır (Ziou & Tabbone, 1998). Ancak, kenar tespiti, görüntü fonksiyonunun türevini almayı içerdiğinden, bu işlem gürültü de dahil olmak üzere tüm yüksek frekanslı bileşenleri güçlendirmektedir. Bu nedenle, sinyaldeki gürültüyü bastırmak için bir tür yumuşatma veya düşük geçişli filtreleme zorunludur. Ne var ki, uygulanan herhangi bir doğrusal filtreleme, kenarları tanımlayan keskin yoğunluk geçişlerini de bulanıklaştırma riski taşımaktadır (Basu, 2002; Meer & Georgescu, 2001).

Şekil 1’ de verilen görselde Sobel ve Prewitt Kenar çıkarım yöntemleri hem orijinal hem de Gaussian yöntemi ile yumuşatılmış görüntüye uygulanmıştır.



Şekil 1. Klasik Kenar Tespit Yöntemleri

Bu zorunluluk bağlamında, Gaussian filtresi, Marr ve Hildreth (1980) tarafından önerildiğinden beri kenar tespitinde açık ara en yaygın kullanılan yumuşatma filtresi olmuştur. Gaussian filtresinin bu kadar popüler olmasının temel nedenleri şunlardır (Basu, 2002):

Optimal Denge: Gaussian filtresi, uzamsal (spatial) ve frekans (frequency) alanlarında eşzamanlı olarak yerelleştirme (localization) hedefleri arasında en iyi dengeyi sağlayan tek operatör olmuştur ve bu özelliği belirsizlik ilişkisini tatmin etmektedir.

Sıfır Geçiş Özelliği: Tek boyutlu (1D) sinyaller Gaussian filtresi ile yumuşatıldığında, ikinci türevlerinin ölçek uzayı (scale space) gösteriminde, mevcut sıfır geçişlerinin ince ölçekten kaba ölçeğe ilerlerken kaybolduğu, ancak yeni sıfır geçişlerinin asla oluşmadığı kanıtlanmıştır (Babaud et al., 1986; Yuille

& Poggio, 1986). Bu benzersiz özellik, sıfır geçişlerinin bir ölçek aralığında izlenmesini mümkün hale getirmektedir. Yuille ve Poggio (1986), bu özelliği iki boyutlu (2D) sinyallere genişletmiş ve Laplacian ile birlikte Gaussian fonksiyonunun, ölçek arttıkça sıfır geçişleri oluşturmayan geniş bir kategorideki tek filtre olduğunu kanıtlamıştır

Biyolojik Vizyon ile İlişki: Gaussian filtrelerinin insan görsel sistemindeki kenar tespitinde önemli bir rol oynamaktadır. Marr ve Hildreth (1980), Gaussian filtresinin (Laplacian operatörü ile birlikte) Gauss Farkı (DOG) filtresine çok benzediğini göstermiştir. Bu benzerlik memeli görsel sistemindeki mekansal alıcı alanların şekline iyi bir yaklaşım sağlamaktadır.

Optimal Operatör Yaklaşımı: Canny (1986), varyasyonel yöntemlerle türettiği optimal kenar tespit operatörü, bir Gaussian fonksiyonunun birinci türevi ile iyi bir şekilde yaklaştırılmıştır.

3.2. Temel Gaussian Tabanlı Kenar Dedektörleri

Gaussian filtresine dayanan iki en iyi bilinen ve etkili geleneksel yöntem, Marr-Hildreth ve Canny dedektörleridir (Basu, 2002).

3.2.1. Marr-Hildreth Dedektörü (LOG): Marr ve Hildreth (1980), anlamlı yoğunluk değişimlerinin görüntü içinde farklı ölçeklerde meydana geldiği varsayımından hareketle çok ölçekli kenar analizinin fikrini ortaya atmıştır. Optimal tespiti sağlamak ve yumuşatma için en uygun filtrenin Gaussian operatörü olması gerektiğini savunmuşlardır. Kenarları tespit etmek için, bu farklı yumuşatma seviyelerine sahip görüntülerde ikinci türevlerin sıfır geçişlerinin bulunmasını önermişlerdir. Bunu, Gaussian'ın Laplasyenini (LOG) bir filtre olarak kullanarak başarmışlardır. LOG operatörü yönelimden bağımsızdır, ancak LOG operatörünün köşe, eğri ve görüntü yoğunluğunun doğrusal olmayan şekilde değiştiği yerlerde bozulduğu ve kenarın doğru konumunu rapor edemediği tespit edilmiştir (Berzins, 1984). Ayrıca, sıfır geçişlerinin yalnızca sinyal-gürültü oranının (SNR) yüksek olduğu ve geçişlerin iyi ayrıldığı durumlarda güvenilir olduğu bulunmuştur.

3.2.2. Canny Dedektörü: Canny (1986), iyi tespit, iyi konumlandırma ve tek bir kenara yalnızca tek bir yanıt olmak üzere üç kriteri optimize ederek bir operatör geliştirmiştir. 1D basamak kenarı için türetilen optimal filtrenin, varyansı σ^2 olan bir Gaussian fonksiyonunun birinci türevi ile iyi bir şekilde yaklaştırıldığı gösterilmiştir (Canny, 1986). Canny'nin optimal operatörü, birinci türev operatörünün çıktısındaki maksimumların, Marr ve Hildreth'in Laplacian operatöründeki sıfır geçişlerine karşılık gelmesi nedeniyle LOG operatörüne benzerdir.

3.3. Gaussian Tabanlı Yöntemlerin Temel Zorlukları

Gaussian tabanlı yöntemler, geleneksel kenar tespiti sürecinde bazı önemli zorluklarla karşılaşmıştır (Basu, 2002): **Tek Ölçek Seçimi:** Görüntüdeki tüm kenarlar için optimal tek bir yumuşatma ölçeği seçmek çok zordur. Küçük bir ölçek, ince ayrıntıları çıkarırken gürültüye karşı hassastır. Daha büyük bir ölçek ise kaba ayrıntıları yakalayabilir ancak konumlandırma hatası büyüebilmektedir.

Çok Ölçekli Analiz Karmaşıklığı: Çok ölçekli kenar tespiti (farklı boyutlarda yumuşatma operatörleri uygulamak), görüntünün farklı kısımlarının değişen derecelerde gürültü içerdiği ve farklı kenar tiplerine sahip olduğu öncülüne dayanarak bir alternatif sunmaktadır. Ancak bu teknik, kaç filtre kullanılacağı, filtre ölçeklerinin nasıl belirleneceği ve farklı filtre tepkilerinin tek bir kenar haritasında nasıl birleştirileceği gibi yeni sorunları beraberinde getirmiştir. Özellikle, LOG sıfır geçişlerini farklı ölçeklerden birleştirmek zordur, çünkü fiziksel olarak anlamlı bir kenar çok sınırlı sayıda ölçekte sıfır geçişiyle eşleşmez ve büyük ölçeklerdeki sıfır geçişleri LOG operatörünün zayıf konumlandırması nedeniyle gerçek kenar konumundan çok uzaklaşmaktadır.

Performans Sınırlamaları: Genel olarak, araştırmalar Gaussian filtrelerini içeren lineer yöntemlerin tamamen tatmin edici sonuçlar vermediğini göstermiştir. Bu yöntemler kenar yer değiştirmesi, kaybolan kenarlar ve yanlış kenarlar gibi sorunlar göstermektedir.

Bu geleneksel zorluklar, daha sonra Dollár ve Zitnick'in Yapılandırılmış Ormanlar (Structured Forests) gibi öğrenme tabanlı yaklaşımları ve nihayetinde Derin Öğrenme tabanlı yaklaşımların geliştirilmesine yol açmıştır (Dollár & Zitnick, 2015).

4. DERİN ÖĞRENME (DL) ÖNCESİ ÖĞRENME TABANLI YAKLAŞIMLAR

DL öncesi dönemdeki Yapısal Öğrenme (Structured Learning) yöntemleri, kenar tespiti alanındaki geleneksel yöntemlerin (Sobel, Canny gibi) yetersiz kaldığı durumları ele almak ve DL tabanlı devrimin temellerini atmak açısından kritik bir köprü görevi görmüştür. Kenar tespiti, uzun yıllardır görüntü işlemede temel bir görev olmasına rağmen, geleneksel yaklaşımlar genellikle renk gradyanlarına dayandığı için doku kenarları veya illüzyonel konturlar gibi görsel olarak belirgin birçok kenarı tespit etmekte başarısız olmuştur. Bu durum, kenar tespiti problemine öğrenme tekniklerinin uygulanmasını zorunlu kılmıştır (Dollár & Zitnick, 2015).

Derin öğrenme öncesi bu öğrenme tabanlı yöntemler, görüntünün yerel yamalarındaki doğal yapıyı (örneğin düz çizgiler, T-kavşakları veya Y-kavşakları gibi) keşfetmek ve bu yapıdan faydalanmak üzerine kurulmuştur (Dollár & Zitnick, 2015; Xie & Tu, 2015). Bu alandaki en belirgin çalışmalardan biri, Dollár ve Zitnick (2015) tarafından önerilen ve gerçek zamanlı performansı ile öne çıkan Yapılandırılmış Ormanlar (Structured Forests - SE) yöntemidir. Bu yaklaşım, kenar yamalarındaki doğal yapının birbirine bağımlı olduğunu öne süren yapılandırılmış öğrenme (structured learning) çerçevesini kullanmıştır. SE yöntemi, kenar tespiti problemini klasik bir gradyan hesaplaması yerine; girdi olarak alınan görüntü yamalarından (patches) yerel segmentasyon maskelerinin tahmin edildiği bir öğrenme problemine dönüştürmüştür. Bu yeni yöntem, literatürdeki diğer yöntemlere göre gerçek zamanlı performans (real-time performance) elde etme konusunda fark yaratmıştır. Dönemin rakip yöntemlerden kat kat daha hızlı çalışırken, BSDS500 veri setinde de o zamanın en iyi sonuçlarını sunmuştur (Dollár & Zitnick, 2015; Xie & Tu, 2015). Benzer şekilde, Lim ve arkadaşları (2013) tarafından önerilen Sketch Tokens gibi diğer yaklaşımlar da, yerel kenar yapısını yakalamak için rastgele orman sınıflandırıcıları kullanarak orta düzey bir temsil öğrenmeye çalışmıştır (Dollár & Zitnick, 2015).

Ancak, Yapılandırılmış Öğrenme ve Sketch Tokens gibi DL öncesi öğrenme tabanlı yöntemler, sonraki derin öğrenme modellerinin sunduğu otomatik hiyerarşik özellik öğrenme yeteneği gibi başarımları sunamadığından yetenekleri sınırlı kalmıştır. (Xie & Tu, 2015). Bu yöntemler, parlaklık, renk, doku ve derinlik gradyanları gibi genellikle insan tarafından tasarlanmış (hand-crafted) çoklu özelliklere bağımlılık göstermektedirler (Dollár & Zitnick, 2015; Xie & Tu, 2015). Derin Evrişimli Sinir Ağları'nın (DCNN) yükselişiyle birlikte, kenar tespiti problemi, HED (Xie & Tu, 2015), RCF (Liu et al., 2017) ve BDCN (He et al., 2019) gibi mimariler aracılığıyla otomatik olarak zengin ve soyut hiyerarşik temsiller öğrenmeye başlamıştır (Liu et al., 2019; Xie & Tu, 2015). Bu DCNN'ler, geleneksel öğrenme tabanlı yöntemlerin aksine, sadece yerel yamalardan değil, görüntünün tüm katmanlarından bütünsel olarak yararlanarak karmaşık sahnelerde yüksek doğruluk sağlamıştır. Dolayısıyla, Yapılandırılmış Ormanlar gibi DL öncesi yöntemler, hız ve yapısal ipuçlarını kullanma konusunda önemli bir adım atsa da, nihai olarak Derin Öğrenmenin otomatik ve çok ölçekli, çok seviyeli özellik çıkarımı yeteneği, DL öncesi öğrenme yaklaşımlarını geride bırakarak alanın yeni standartlarını belirlemiştir (Xie & Tu, 2015).

5. DERİN ÖĞRENME (DL) TABANLI YÖNTEMLER

Derin Öğrenme (DL) tabanlı yöntemler, klasik yöntemlerin yetersiz kaldığı karmaşık sahnelerde yüksek doğruluk ve dayanıklılık sunarak kenar tespiti

alanında önemli bir dönüşüm yaratmıştır. Bu yöntemler, esas olarak otomatik hiyerarşik özellik öğrenmenin önemine odaklanmakta ve geleneksel el yapımı (hand-crafted) özelliklere olan bağımlılığı ortadan kaldırmaktadır (Xie & Tu, 2015; Liu et al., 2017). DL modelleri, görüntünün tüm katmanlarından bütünsel olarak yararlanarak zengin ve soyut kenar temsillerini öğrenebilme yeteneğine sahiptir (Xie & Tu, 2015).

5.1. Derin Öğrenme Yöntemlerinin Ortaya Çıkışı ve Evrimi

Geleneksel operatörlerin el yapımı (hand-crafted) özelliklere bağımlı olması ve karmaşık dokularda yetersiz kalması, araştırmacıları otomatik özellik çıkarımı yapabilen Derin Öğrenme tabanlı yaklaşımlara yöneltmiştir (Dollár & Zitnick, 2015).

5.2. Erken Öğrenme Tabanlı Yaklaşımlar

DL öncesinde dahi öğrenme temelli yaklaşımlar mevcuttur. Örneğin, Dollár ve Zitnick (2015), yerel görüntü yamalarındaki doğal yapıdan (düz çizgiler veya T-kavşakları gibi) yararlanmak amacıyla Yapılandırılmış Ormanlar (Structured Forests - SE) yöntemini geliştirmiştir. Bu yaklaşım, girdi görüntü yamalarından doğrudan yerel segmentasyon maskelerini tahmin ederek çalışmış ve geleneksel operatörlere göre çok daha hızlı (gerçek zamanlı performansına yakın) bir çıkarım hızı elde etmiştir (Dollár & Zitnick, 2015; Xie & Tu, 2015). Ancak bu yöntemler, modern DL modellerinin sağladığı otomatik hiyerarşik özellik öğrenme yeteneğinden yoksun kalmışlardır (Xie & Tu, 2015).

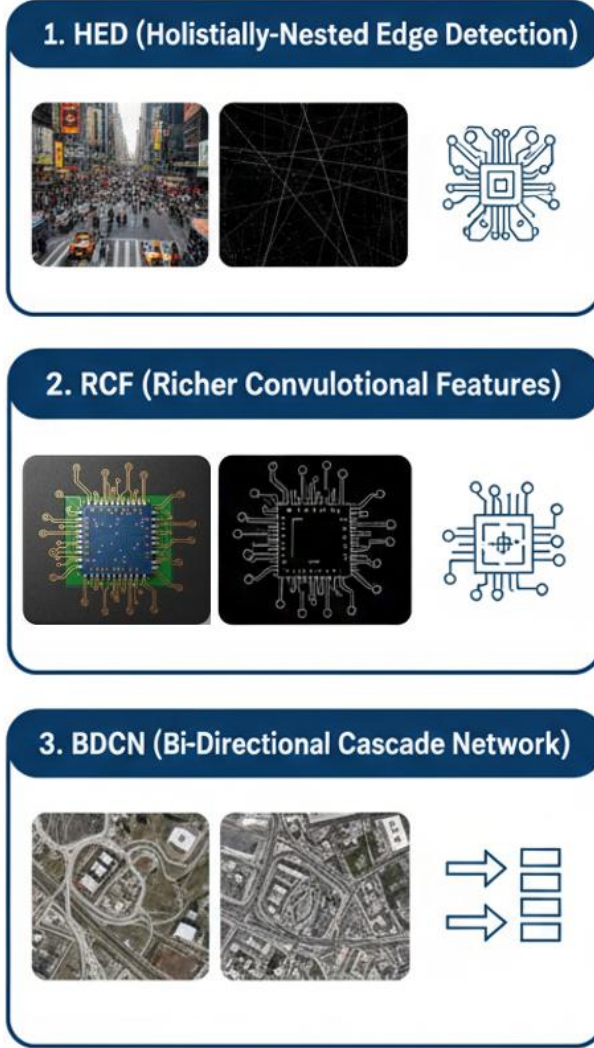
5.3. Evrişimli Sinir Ağları (CNN) Tabanlı Modeller

Evrişimli Sinir Ağları (CNN), geleneksel yöntemlerin gürültü hassasiyeti ve "el yapımı" (hand-crafted) özniteliklere olan bağımlılık gibi temel kısıtlarını aşarak, modern kenar tespiti yaklaşımlarının bel kemiğini oluşturmuştur. CNN'lerin başarısı, hiyerarşik ve soyut öznitelikleri veriden otomatik olarak öğrenebilme yeteneğine dayanmaktadır. CNN'lerin bu alandaki yükselişi, otomatik hiyerarşik özellik öğrenmenin önemine odaklanan yeni bir gelişim dalgasını temsil etmektedir (Liu et al., 2019; Xie & Tu, 2015). DL tabanlı yaklaşımlar, genellikle Tamamen Evrişimsel Sinir Ağları (FCN) mimarilerini kullanarak, görüntüyü girdi olarak alan ve piksel düzeyinde tahmin gerçekleştirerek aynı boyutta bir kenar haritası üreten Görüntüden Görüntüye Tahmin (Image-to-Image Prediction) prensibiyle çalışmaktadır (Long et al., 2015; Xie & Tu, 2015). Bu mimariler, farklı katmanlardaki evrişimli özelliklerin bütünsel bir şekilde kullanılmasıyla zengin ve soyut kenar temsillerini öğrenme yeteneğine sahiptir (Liu et al., 2017; Xie & Tu, 2015).

CNN'lerin doğası gereği, derin katmanlar arasında hiyerarşik özellikler oluşturulur ve bu hiyerarşi, kenar tespiti için kritik öneme sahiptir. Ağın sığ (shallow) katmanları (daha küçük alıcı alanlara sahip olanlar), ince ayrıntıları, yerel yapıları ve doğru yerelleştirme ipuçlarını yakalamaktadır (Liu et al., 2017; Xie & Tu, 2015). Buna karşılık, derin katmanlar (daha büyük alıcı alanlara sahip olanlar) ise nesne düzeyinde, global bağlamsal ve semantik bilgileri kodlamaktadır (Liu et al., 2019; Xie & Tu, 2015). Bu farklı seviyelerdeki bilgileri entegre etme ihtiyacı, Holistically-Nested Edge Detection (HED) gibi dönüm noktası niteliğindeki mimarilerin geliştirilmesine yol açmıştır. HED, VGGNet gibi önceden eğitilmiş ağırları temel alarak ve derin denetim (deep supervision) kullanarak her bir aşamanın son evrişim katmanından yan çıktı (side output) üretmektedir. Bu çıktıların denetlenmesi ve birleştirilmesi, modelin erken katmanlarda bile anlamlı kenar bilgileri üretmesini sağlamıştır (Xie & Tu, 2015). HED'nin başarısını temel alan Richer Convolutional Features (RCF) modeli ise, daha da ileri giderek her bir evrişim katmanından gelen özelliklerin tamamını birleştirmenin (yalnızca her aşamanın son katmanı yerine) daha doğru ve zengin temsiller sağladığını göstermiştir (Liu et al., 2017; Liu et al., 2019).

Daha yeni CNN tabanlı yaklaşımlar, performans artışını sağlamak için ağ derinliğini artırmak yerine verimliliğe ve özelleşmiş mimari tasarımlara odaklanmıştır. Örneğin, Bi-Directional Cascade Network (BDCN), sığ bir CNN yapısıyla çalışırken bile rekabetçi performans elde etmeyi amaçlamıştır (He et al., 2019). BDCN, her bir ağ katmanının belirli bir ölçekteki kenarlara odaklanmasını sağlamak için çift yönlü kaskat yapısı ve katmana özel denetim kullanmıştır (He et al., 2019). Ayrıca, BDCN, derinliği artırmak yerine Ölçek Geliştirme Modülü (Scale Enhancement Module - SEM) gibi teknikleri kullanarak, dilated convolution ile çok ölçekli temsilleri verimli bir şekilde zenginleştirmiştir (He et al., 2019). CNN'lerin yüksek doğruluk ve çıkarım verimliliği (örneğin, gerçek zamanlı performansa ulaşma) sağlama yeteneği, bu modelleri beton çatlak tespiti (Cha & Choi, 2017) veya semantik segmentasyon (Chen et al., 2016) gibi geleneksel yöntemlerin yetersiz kaldığı karmaşık, gerçek dünya uygulamalarına taşımıştır. Bu tür uzmanlık alanlarında CNN'ler, geleneksel görüntü işleme tekniklerinin aksine, görüntü özelliklerini manuel olarak çıkarma ihtiyacını ortadan kaldırarak daha sağlam ve uyarlanabilir çözümler sunmaktadır (Cha & Choi, 2017).

Şekil 2' de verilen görselde DL yöntemleri ile kenar çıkarım uygulamaları sunulmuştur.



Şekil 2. DL Kenar Tespit Yöntemleri

5.4. Semantik Kenar Tespiti (SED)

Standart kenar tespiti yöntemleri yalnızca fiziksel sınırları belirlemeye odaklanırken, modern bilgisayarlı görü uygulamaları sınırların "anlamını" da bilmeyi gerektirir. Bu ihtiyaç, Semantik Kenar Tespiti (SED) alanını doğurmuştur. SED, kenar tespitini basit bir sınır çiziminden öteye taşıyarak nesne sınıfları ile ilişkilendirilmiş (category-aware) bir yapıya büründürmüştür (Liu et al., 2020).

SED, doğası gereği, bir kenar pikselinin birden fazla semantik sınıfla ilişkilendirilebilme potansiyeli taşıyan çok etiketli (multi-label) bir problem

olarak modellenmektedir. Örneğin, bir kenar pikseli, iki veya daha fazla semantik sınıfın sınırında bulunduğu (konturlar veya eklem yerleri) birden çok etikete sahip olabilir (Yu et al., 2017). Bu yetenek, anlamsal segmentasyon, nesne tanıma, nesne önerisi üretimi ve 3D yeniden yapılandırma gibi çeşitli üst düzey bilgisayarlı görü görevleri için kritik faydalar sağlamaktadır (Liu et al., 2020). Geleneksel yaklaşımlar (Dollár & Zitnick, 2015), el yapımı özelliklere bağımlı olmaları nedeniyle bu tür karmaşık anlamsal temsilleri öğrenmekte yetersiz kalırken, DCNN'ler hiyerarşik özellikleri otomatik olarak öğrenme yeteneği sayesinde SED'in gerektirdiği yüksek seviyeli bilgiyi sağlayabilmiştir.

5.5. Derin Denetim Zorluğu ve Çözüm Arayışları

DL tabanlı SED, “doğası gereği ince ayrıntılı kenarların kesin konumlandırılması (düşük seviyeli özellikler)” ve “soyutlanmış yüksek seviyeli anlamsal bilgilerin tanımlanması” denetim hedefini eşzamanlı olarak başarması gerekmektedir (Liu et al., 2020). Bu iki amaç arasındaki gerilim, DCNN mimarilerinde derin denetim (deep supervision) uygulanmasını zorlaştırmıştır.

Bu alanda öne çıkan mimarilerden CASENet, bu hedeflere ulaşmak için ResNet'i temel alan bir atlama katmanı (skip-layer) yapısı kullanmıştır. CASENet, özellik zenginleştirilmesi için alt katman özelliklerini üst katmandaki kategori aktivasyonlarıyla birleştirmektedir (Yu et al., 2017). Ancak, CASENet'in yazarları, ağır alt katmanlarına kategori-agnostik kenar bilgisiyle derin denetim uygulandığında, üst katmanlardaki anlamsal sınıflandırmanın uyumsuzluk (divergence) yaşadığını gözlemlemiştir (Liu et al., 2020; Yu et al., 2017). Bu durum, alt katmanların kenar ayrıntılarına odaklanmaya zorlanması ile üst katmanların anlamsal hedefleri öğrenmesi arasındaki çatışan denetim hedeflerinden kaynaklanmaktadır (Liu et al., 2020). Bu nedenle, CASENet ve onu takip eden diğer SED yöntemleri, alt katmanlara derin denetim uygulamaktan kaçınmıştır (Yu et al., 2017).

Bu temel sorunu çözmek amacıyla, Çeşitli Derin Denetim (Diverse Deep Supervision - DDS) yöntemi önerilmiştir. DDS, tüm katmanlarda tek tip denetim kullanmak yerine, düşük seviyeli detaylar ve yüksek seviyeli semantik hedefler için farklılaştırılmış denetim mekanizmaları uygulaması başarısının temelini oluşturmaktadır (Liu et al., 2020).

DDS, bu çatışmayı önlemek için bir bilgi dönüştürücü birimi (information converter unit) sunmaktadır. Bu dönüştürücü, omurga ağından gelen özellikleri, kategori-agnostik veya semantik kenar tespiti için gerekli olan farklı gösterimlere dönüştüren bir "arabellek" görevi görmektedir. Bu mimari, alt katmanların kategori-agnostik kenar ayrıntılarını öğrenmesini sağlarken, üst katmanların anlamsal kategorileri öğrenmesini olanak sağlamaktadır. Böylece, alt

katmanlardan gelen ince detaylar, üst katmanların nihai semantik kenar konumlandırma kalitesini artırmasına yardımcı olmaktadır. DDS-U adı verilen, hizalanmış kenarlar ve ağırlıksız kayıp fonksiyonu kullanılarak eğitilen DDS modelinin, literatürde en iyi performansları elde ettiği belirtilmiştir (Liu et al., 2020).

DL tabanlı SED çözümleri, bu yenilikçi mimariler sayesinde, kenar tespiti görevini yalnızca düşük seviyeli bir gradyan hesaplaması olmaktan çıkarıp, bütünsel bir anlamsal yorumlama problemine dönüştürmüştür (Liu et al., 2020).

5.6. Trasformer ve Hibrit Yaklaşımlar

Derin Öğrenme (DL) tabanlı kenar tespiti yöntemleri, görüntü işleme alanında geleneksel yöntemlerin sınırlamalarını aşarak büyük ilerlemeler kaydetmiştir. Bu ilerlemelerin bir parçası olarak, kaynaklarda hem Transformer mimarilerinin doğrudan entegrasyonu hem de eski/yeni teknikleri birleştiren çeşitli hibrit yaklaşımlar detaylandırılmaktadır. Bu yeni yöntemler, özellikle çok ölçekli bilgi kullanımı, verimlilik ve anlamsal bağlamın derinlemesine anlaşılması konularına odaklanmaktadır.

5.6.1. Transformer Tabanlı Yöntemlerin Yükselişi

Transformer mimarileri, başlangıçta doğal dil işleme için geliştirilmiş olsa da, uzun menzilli bağlamsal bilgileri modelleme konusundaki üstün yetenekleri sayesinde görme görevlerinde de önemli başarılar elde etmiştir. Bu bağlamda, kaynaklarda önerilen en dikkat çekici yenilik, kenar tespiti için tasarlanmış ilk Transformer tabanlı model olan Edge Detection TransformER (EDTER) mimarisidir (Pu et al., 2022).

EDTER mimarisi iki aşamalı hibrit bir yapı sunar (Pu et al., 2022):

Aşama I (Global Bağlam Modellemesi): Girdi görüntüsü kaba taneli yamalara ayrılarak, bir Vision Transformer (ViT) kodlayıcısı aracılığıyla uzun menzilli global bağlam modellenmektedir. Bu bağlam, semantik olarak anlamlı kenarları tespit etmek için önemlidir (Pu et al., 2022; Su et al., 2021).

Aşama II (Lokal İyileştirme): Aynı görüntü, ince detayları ve lokal ipuçlarını yakalamak amacıyla ince taneli yamalar halinde işlenmektedir (Pu et al., 2022).

Her iki aşamadan elde edilen özellikler, Bi-directional Multi-Level Aggregation (BiMLA) kod çözücü (decoder) kullanılarak yüksek çözünürlüklü gösterimlere dönüştürülmekte ve son olarak, bir Feature Fusion Module (FFM) aracılığıyla birleştirilerek nihai kenar haritası tahmin edilmektedir (Pu et al., 2022; Pu et al., 2021).

Transformer mimarilerinin kullanıldığı bir diğer hibrit yaklaşım, Segment Anything Model (SAM) tabanlı adapte edilmiş yöntemlerdir. SAM, güçlü sınır yerelleştirme (boundary localization) yeteneği nedeniyle DL tabanlı kenar tespiti için bir omurga (backbone) olarak seçilmiştir. Ancak, SAM nesne düzeyinde segmentasyon için tasarlandığından, kenar tespiti için kritik olan ince detayları gözden kaçırma eğilimindedir. Bu nedenle, CNN dalı ve adaptörler ile desteklenen bir ayarlama (tuning) stratejisi uygulanmaktadır. Bu hibrit yapı, GPU bellek tüketimini azaltırken yerel kenar hassasiyetini artırmayı hedeflemektedir (Yang et al., 2025).

5.6.2. CNN Tabanlı Gelişmiş Hibrit Mimari Yaklaşımlar

DL tabanlı yöntemler, yalnızca Transformer'lara odaklanmak yerine, CNN'lerin yeteneklerini, geleneksel veya yeni mimari bileşenlerle birleştirerek hibrit çözümler de üretmiştir. Bu çözümler genellikle verimliliği ve ölçek hassasiyetini artırmayı amaçlamaktadır.

Çift Yönlü Kaskat Ağ (BDCN): BDCN, sığ (shallow) bir CNN yapısında çok ölçekli temsilleri verimli bir şekilde öğrenmek için Çift Yönlü Kaskat (Bi-Directional Cascade) yapısını kullanmaktadır. BDCN'de, her bir ağ katmanı, genel bir zemin gerçeği (ground truth) haritasıyla değil, katmana özel denetim (layer-specific supervision) ile eğitilmektedir. Bu, her katmanın belirli bir ölçekteki kenarlara odaklanmasını sağlamaktadır. BDCN, çok ölçekli bağlamı yakalamak için Ölçek Geliştirme Modülü (Scale Enhancement Module - SEM) adlı hibrit bir bileşen kullanmaktadır (He et al., 2019; He et al., 2020). SEM, çözünürlüğü düşürmeden veya parametreleri artırmadan alıcı alanı (receptive field) genişleten dilate edilmiş evrişim (dilated convolution) yönteminden faydalanmaktadır (He et al., 2020).

Piksel Farkı Evrişimleri (PDC) ve PiDiNet: Bu yaklaşım, geleneksel kenar operatörlerinin temel bilgisini (gradyan) modern CNN'lere entegre etmektedir. PiDiNet (Pixel Difference Network) mimarisi, geleneksel operatörlerin aksine, piksel farklılıklarını açıkça hesaplayarak gradyan bilgisinin yakalanmasını kolaylaştıran Piksel Farkı Evrişimleri (PDC) kullanmaktadır. PDC, CNN'lerin güçlü öğrenme yeteneğini geleneksel operatörlerin gradyan bilgisiyle birleştirmektedir. Bu yöntem, büyük ImageNet veri setinde ön eğitim gerektirmeden, BSDS500 veri setinde insan algısını aşan sonuçlara ulaşarak verimlilik ve doğruluk açısından önemli ilerleme kaydettiğini göstermiştir (Su et al., 2021).

5.6.3. Geleneksel ve DL Yöntemlerini Birleştiren Hibrit Yaklaşımlar

Bazı hibrit yaklaşımlar ise, DL'yi geleneksel görüntü işleme veya filtreleme teknikleriyle birleştirerek spesifik sorunlara çözüm bulmuştur.

Domain Transform (DT) Tabanlı Entegrasyon: Bu yaklaşım, semantik segmentasyon bağlamında, tam bağlantılı Koşullu Rastgele Alanlar (CRF) yerine Domain Transform (DT) filtresini kullanmayı önermektedir. DT, bir referans kenar haritası tarafından yumuşatma miktarı kontrol edilen, kenar koruyucu bir filtreleme yöntemidir. Bu hibrit modelde, referans kenar haritası, standart görüntü gradyanı yerine, CNN'in ara özelliklerinden öğrenilmektedir. Bu sayede, sistem, nihai segmentasyon kalitesini doğrudan optimize etmek için göreve özgü kenarları (task-specific edges) uçtan uca öğrenmektedir (Chen et al., 2016).

Gürültü Azaltıcı Hibrit Dedektör: Çatlak tespiti alanında, bir çalışma, DCNN'i geleneksel kenar detektörleriyle (örneğin LoG) birleştiren bir hibrit yöntem önermiştir. Bu yöntemde, DCNN (AlexNet), görüntüyü çatlaklı veya çatlaklı olmayan olarak sınıflandırmak için kullanılmakta; ardından, yalnızca çatlaklı olarak etiketlenen görüntülere geleneksel kenar detektörleri uygulanmaktadır. Bu strateji, geleneksel detektörlerin ana sorunu olan "residual gürültüyü" 24 kat azaltmıştır (Dorafshan et al., 2018).

5.7. Temel Özellikler ve Başarılar

DL tabanlı yöntemlerin performansı, geleneksel yöntemlere göre önemli ölçüde yüksektir ve bu başarı, bir dizi temel DL tekniğiyle ilişkilendirilmiştir.

Çok Ölçekli ve Çok Seviyeli Özellik Füzyonu: DL, evrimsel özelliklerin tüm katmanlardan bütünsel bir şekilde kullanılmasıyla zengin ve soyut kenar temsillerini öğrenme yeteneğine sahiptir (Xie & Tu, 2015). Yüksek katmanlar, nesne düzeyinde (object-level) ve semantik bilgileri içerirken, alt katmanlar ince ayrıntıları ve yerelleştirme ipuçlarını yakalamaktadır. RCF, bu katmanlar arası özelliklerin tamamını kullanarak en yüksek performansı elde etmiştir (Liu et al., 2017).

Derin Denetim (Deep Supervision): HED gibi ağlar, ara katmanlardaki çıktıları doğrudan denetleyerek, hiyerarşik özelliklerin öğrenimini yönlendirmektedir. Bu, modelin yalnızca son katmandan gelen geri bildirimle güvenmek yerine, erken aşamalarındaki özellik haritalarının da anlamlı kenar bilgileri üretmesini sağlamaktadır (Xie & Tu, 2015).

Hız ve Verimlilik: Dollár ve Zitnick'in Yapılandırılmış Ormanlar (SE) yönteminin gerçek zamanlı performansa ulaşmasıyla başlayan hız odaklı gelişim, modern DL mimarilerinde de devam etmiştir (Dollár & Zitnick, 2015). HED,

önceki CNN tabanlı yöntemlere göre çok daha hızlı tahmin süreleri sunarak (görüntü başına 0,4 saniye) önemli bir verimlilik sağlamıştır (Xie & Tu, 2015).

Bu kaynaklar, DL tabanlı yöntemlerin, kenar tespiti görevini yalnızca lokal gradyanları hesaplamaktan çıkarıp, bağlamsal ve anlamsal olarak zengin temsilleri öğrenen bütünsel bir tahmine dönüştürdüğünü açıkça göstermektedir.

6. TEMEL SORUNLAR VE ZORLUKLAR

Kenar tespiti, görüntü işleme ve bilgisayarlı görü alanlarında 50 yılı aşkın süredir devam eden temel bir görev olmasına rağmen (Basu, 2002), algoritmaların sahnedeki nesnelerin şekillerine dair kritik bilgileri doğru ve güvenilir bir şekilde çıkarmasını engelleyen bir dizi temel sorun ve zorlukla karşılaşmaktadır. Bu zorluklar, hem klasik yöntemlerin doğasından hem de modern Derin Öğrenme (DL) tabanlı yaklaşımların getirdiği yeni karmaşıklıklardan kaynaklanmaktadır.

6.1. Geleneksel Yöntemlerin Yapısal Zorlukları

Klasik kenar tespiti yöntemleri (Sobel, Prewitt gibi), genellikle görüntü yoğunluğundaki yerel gradyanlara dayanmaktadır. Ancak bu yaklaşımlar, temel fiziksel ve matematiksel zorluklar nedeniyle sınırlı kalmıştır:

6.1.1. Gürültü ve Yumuşatma/Bulanıklaştırma İkilemi

Daha önce değinildiği üzere, kenar tespitinin doğasında var olan farklılaştırma işlemi gürültüyü artırırken, gürültüyü bastırmak için uygulanan yumuşatma işlemi kenar konumlandırma hassasiyetini düşürmektedir. Bu durum, geleneksel yöntemlerin aşmakta zorlandığı temel bir optimizasyon çelişkisidir. Bu durum, kenarın konumlandırma (localization) hatasına yol açmaktadır (Basu, 2002; Meer & Georgescu, 2001).

6.1.2. Optimal Ölçek Seçimi Sorunu

Görüntüdeki tüm kenarlar için optimal tek bir yumuşatma ölçeği (filtre boyutu) seçmek çok zordur. Küçük bir ölçek, ince ayrıntıları çıkarırken gürültüye karşı daha hassas olur; oysa büyük bir ölçek, kaba ayrıntıları çıkarır, ancak tespit edilen kenarın konumlandırma hatası büyük olabilir. Bu çelişkili hedefler nedeniyle, çok ölçekli kenar tespiti (farklı boyutlarda operatörler kullanmak) bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Ancak bu teknik, kaç filtre kullanılacağı, filtre ölçeklerinin nasıl belirleneceği ve farklı ölçeklerden gelen bilgilerin tek bir kenar haritasında nasıl birleştirileceği gibi yeni sorunlar yaratmıştır (Basu, 2002).

6.1.3. Yanlış ve Kaybolan Tespitler

Gürültü ve niceleme (quantization) nedeniyle, kenar tespiti sırasında kenarın mevcut olmadığı yerlerde yoğunluk değişimlerinin (yani yanlış pozitiflerin veya

sahte kenarların) bulunması mümkündür (Meer & Georgescu, 2001). Benzer nedenlerle, mevcut kenarları tamamen kaçırmak da mümkündür (yanlış negatifler veya kaybolan kenarlar). Özellikle Gaussian'ın Laplasyeni (LOG) ile filtrelenmiş görüntüler, orijinal görüntüdeki kenarlara karşılık gelen kenarların filtrelenmiş görüntüde oluşmaması gibi kaybolan kenar sorunu problem oluşturmaktadır. Canny dedektörü gibi daha sofistike operatörler bile, önemsiz yoğunluk değişimlerinin olduğu yerlerde sahte ve kararsız sınırlara (spurious and unstable boundaries) karşı hassas olabilmektedir (Basu, 2002).

6.2. Derin Öğrenme (DL) Tabanlı Yöntemlerdeki Yeni Zorluklar

Derin öğrenme, geleneksel yöntemlerin aksine hiyerarşik özellikleri otomatik olarak öğrenerek (Xie & Tu, 2015) birçok sorunu çözmüş olsa da, büyük ölçekli modern ağların doğası gereği yeni zorluklar ortaya çıkmıştır:

6.2.1. Bellek Tüketimi ve Hesaplama Maliyeti

Yüksek performanslı DL tabanlı kenar detektörlerinin çoğu (HED, RCF gibi), genellikle ImageNet gibi büyük veri setlerinde önceden eğitilmiş büyük CNN omurgalarını (backbone) (örneğin VGG16) kullanmaktadır (Su et al., 2021; Xie & Tu, 2015). Bu durum, ağları bellek ve enerji tüketen, yüksek hesaplama maliyetli yapılar haline getirip ve çıkarım (inference) hızını düşürmektedir. Bu durum, özellikle gömülü sistemler veya gerçek zamanlı uygulamalar için bir kısıtlama teşkil etmektedir (Su et al., 2021).

6.2.2. Özellik Kaybı ve Yerelleştirme Hassasiyeti

CNN'ler derinleştikçe, alıcı alanların büyümesi ve semantik bilginin zenginleşmesiyle birlikte (Xie & Tu, 2015), yerel detaylar ve ince kenar bilgileri kademeli olarak baskılanmakta ve kaybolmaktadır (Pu et al., 2022). Bu durum, ideal olarak tek piksel genişliğinde olması gereken keskin ve kesin kenarları tespit etme hedefiyle çelişmektedir (Xie & Tu, 2015).

6.2.3. Etiket Belirsizliği ve Gürültü

DL modelleri, çoklu insan notlarına dayanan veri kümelerinde (örneğin BSDS500), annotatörler arasındaki tutarsızlıklar nedeniyle etiket belirsizliği (label ambiguity) ve gürültü sorunlarıyla karşılaşmaktadır (Dollár & Zitnick, 2015; Xie & Tu, 2015). İnsanların kenarları nerede işaretleyeceği konusundaki farklı tercihleri, homojen veya dokulu bölgelerin kenar olarak etiketlenmesine (yanlış pozitif), zayıf kenarların atlanmasına (yanlış negatif) veya kenar konumlarının kaymasına neden olabilmektedir (Dollár & Zitnick, 2015; Yang et al., 2025). Bu gürültü, DL modellerinin genelleme yeteneğini ve sağlamlığını düşürebilmektedir.

6.2.4. Derin Denetim (Deep Supervision) Hedef Çatışması

Özellikle Semantik Kenar Tespiti (SED) gibi yüksek seviyeli görevlerde, DL mimarilerinde farklı denetim hedefleri arasında çatışma ortaya çıkarmaktadır (Liu et al., 2020; Yu et al., 2017). Alt (sığ) katmanlar düşük seviyeli, kategori-agnostik kenar ayrıntılarını öğrenmeye odaklanmalıdır; oysa üst (derin) katmanlar kategori-farkındalıklı (semantic-aware) bilgileri tanımaya odaklanmalıdır (Liu et al., 2020). CASENet gibi modeller, bu farklı hedeflerin aynı omurga ağına uygulanmasının anlamsal sınıflandırmada uyumsuzluğa (divergence) yol açtığını ve bu nedenle alt katmanlara derin denetim uygulamanın gereksiz olduğunu savunmuştur (Liu et al., 2020.; Yu et al., 2017).

6.2.5. Kayıp Fonksiyonu ve Sınıf Dengesizliği Problemi

Derin öğrenme tabanlı kenar tespitinde, görüntüdeki piksellerin büyük çoğunluğunun (%90'dan fazlası) kenar olmayan (non-edge) piksellerden oluşması, ciddi bir sınıf dengesizliği (class imbalance) yaratmaktadır. Standart çapraz entropi kaybı, bu dengesizlik nedeniyle modelin boş bir çıktı (tüm piksellerin 0 olduğu) üretmeye meyilli olmasına yol açmaktadır. Xie ve Tu (2015), sınıf dengesizliği problemini çözmek için HED ve RCF gibi mimarilerde sınıf-ağırlıklı çapraz entropi kaybı (class-balanced cross-entropy loss) kullanılmaktadır.

Bir giriş görüntüsü X ve buna karşılık gelen zemin gerçeği (ground truth) kenar haritası $Y = \{y_j, j = 1, \dots, |X|\}$ olsun; burada $y_j \in \{0, 1\}$ pikselin kenar olup olmadığını belirtmektedir. Her bir yan çıktı (side output) katmanı m için kayıp fonksiyonu şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$\mathcal{L}_{side}^{(m)}(W, w^{(m)}) = -\beta \sum_{j \in Y_+} \log \Pr(y_j = 1|X; W, w^{(m)}) - (1 - \beta) \sum_{j \in Y_-} \log \Pr(y_j = 0|X; W, w^{(m)})$$

Burada:

Y_+ ve Y_- , sırasıyla kenar ve kenar olmayan piksellerin indis kümelerini temsil etmektedir.

$\beta = |Y_-|/|Y|$ ve $1 - \beta = |Y_+|/|Y|$, pozitif ve negatif sınıflar arasındaki dengesizliği gidermek için kullanılan dengeleme katsayılarıdır.

Burada W , ağıın tüm katmanlarında paylaşılan ortak ağırlık parametrelerini (backbone weights); $w^{(m)}$ ise m . aşamaya özgü olan ve yan çıktıları üreten katmanın ağırlıklarını temsil etmektedir.

Derin denetim (Deep Supervision) mekanizması, tüm yan çıktıların ve en son füzyon katmanının (fusion layer) toplam hatasını minimize etmeyi

hedeflemektedir. Toplam kayıp fonksiyonu ($\mathcal{L}_{total}$), yan çıktı kayıpları ve füzyon kaybının ($\mathcal{L}_{fuse}$) ağırlıklı toplamı olarak ifade edilmektedir (Xie & Tu, 2015):

$$\mathcal{L}_{total} = \sum_{m=1}^M \alpha_m \mathcal{L}_{side}^{(m)} + \mathcal{L}_{fuse}$$

Burada α_m , her bir yan çıktının toplam hataya etkisini belirleyen ağırlık katsayısıdır. Eğitim sürecinde bu kayıp fonksiyonu, geri yayılım (backpropagation) algoritması ile minimize edilerek hem yerel detayların (sığ katmanlardan) hem de anlamsal sınırların (derin katmanlardan) eş zamanlı öğrenilmesi sağlanmaktadır.

7. UYGULAMA ALANLARI

Kenar tespiti, bilgisayarlı görü alanında 50 yılı aşkın süredir temel bir problem olmasının yanı sıra, görüntülerin yapısını ve içeriğini anlamayı amaçlayan **çeşitli üst düzey (high-level) vizyon görevleri** için kritik bir ön işlem veya temel adım olarak hizmet etmektedir (Ziou & Tabbone, 1998). Kenar temsili, sahnedeki nesnelerin şekilleri hakkında önemli bilgileri koruyarak işlenmesi gereken veri miktarını önemli ölçüde azaltmaktadır (Basu, 2002). Kaynaklar, kenar tespiti yöntemlerinin geniş ve çeşitli uygulama yelpazesini açıkça ortaya koymaktadır.

7.1. Temel Görüntü İşleme ve Üst Düzey Vizyon Görevleri

Kenar tespiti, bir görüntünün temel yapısal iskeletini sağladığı için, bu bilgilerden yararlanan neredeyse tüm vizyon uygulamalarının merkezinde yer almaktadır:

Nesne Şekil Bilgisi ve Tanıma: Kenar tespiti, sahnedeki nesnelerin şekilleri hakkında önemli bilgileri muhafaza ettiğinden, bu görüntü tanımı nesne tanıma algoritmalarına kolayca entegre edilebilmektedir (Basu, 2002; Ferrari et al., 2008). Geleneksel yaklaşımlar da dâhil olmak üzere tüm kenar detektörleri, nesne tanıma, nesne takibi (object tracking) ve hareket analizi gibi geleneksel görevler için hayati öneme sahiptir (Xie & Tu, 2015; Muntarina et al., 2022).

Görüntü Segmentasyonu: Kenar tespiti, bir sınır tabanlı segmentasyon yöntemi olarak kabul edilir ve bu, görüntü segmentasyonu algoritmalarına kolayca entegre edilmesini sağlamaktadır (Arbeláez et al., 2011; He et al., 2019; Muntarina et al., 2022; Ziou & Tabbone, 1998). Geleneksel olarak gPb (Arbeláez et al., 2011) veya Yapılandırılmış Ormanlar (Dollár & Zitnick, 2015) gibi yöntemler, bölge hiyerarşisi oluşturarak segmentasyonun temelini atmıştır. Modern DL tabanlı yöntemler ise, bu yeteneği daha da ileriye taşımıştır (Long et al., 2015; Xie & Tu, 2015).

Semantik Kenar Tespiti (SED): Semantik kenar tespiti, yalnızca kenarları çıkarmayı değil, aynı zamanda onları ilişkili nesne kategorileriyle sınıflandırmayı amaçlayan daha zorlu bir görevdir (Liu et al., 2020). SED; semantik segmentasyon (bir görüntüdeki her piksele bir anlamsal etiket atanması), nesne önerisi oluşturma (object proposal generation) ve nesne tanıma gibi bir dizi üst düzey vizyon görevi için kritik bir ön koşuldur (Liu et al., 2020; Yu et al., 2017). Örneğin, CNN tabanlı bir yöntem olan EdgeNet, semantik segmentasyon kalitesini doğrudan optimize etmek için göreve özgü (task-specific) kenarları öğrenmede kullanılmıştır (Chen et al., 2016).

3D Yeniden Yapılandırma ve Stereo Vizyon: Kenar tespiti, yapıdan hareket (structure-from-motion) analizi ve 3D yeniden yapılandırma gibi uygulamalarda kullanılmaktadır (Xie & Tu, 2015). Ayrıca, derinlik (depth) bilgisi içeren RGB-D görüntülerindeki kenarlar, iç mekan sahnelerinin algılanması ve tanınması (Gupta et al., 2013) ile nesne algılama ve segmentasyonu (Gupta et al., 2014) için kullanılmaktadır.

7.2. Endüstriyel ve Uzmanlık Alanlarındaki Uygulamalar

Kenar tespiti, belirli endüstriyel zorlukları ve uzmanlık gerektiren görsel analiz görevlerini çözmek için kritik öneme sahiptir:

Yapısal Sağlık İzleme (SHM) ve Çatlak Tespiti: Görüntü tabanlı çatlak tespiti (crack detection), beton veya çelik yapılardaki yüzey kusurlarını, hasarları ve çatlakları izlemek için kullanılmaktadır (Dorafshan et al., 2018; Zou et al., 2019). Geleneksel kenar detektörleri (Sobel, Canny, LoG) çatlakları tespit edebilse de, derin öğrenme tabanlı yöntemler (DCNN'ler) gürültüyü önemli ölçüde azaltarak daha yüksek doğruluk sağlamaktadır (Dorafshan et al., 2018; Zou et al., 2019). Bu, yorulma çatlaklarının ve beton kusurlarının otomatik olarak tespit edilmesini sağlayarak insan denetimlerini kısmen veya tamamen ikame etmeyi amaçlamaktadır (Cha & Choi, 2017; Dorafshan et al., 2018).

Uzaktan Algılama ve Kentsel Alan Analizi: Yüksek çözünürlüklü hava görüntüleme (aerial imagery) ve uzaktan algılama verilerinde kenar tespiti, arazideki nesnelerin (binalar, araçlar, bitki örtüsü) sınıflandırılması ve sınırlandırılması için hayati öneme sahiptir (Marmanis et al., 2018). Özellikle şehir bölgelerindeki küçük nesnelerin veya semantik sınırların tespiti için DCNN'ler, geleneksel yöntemlere göre daha sağlam çözümler sunmaktadır (Marmanis et al., 2018).

Tarım ve Meyve Büyümesi İzleme: Tarım alanında kenar tespiti, elma gibi meyvelerin yatay çapının uzaktan doğru bir şekilde tahmin edilmesi ve büyüme süreçlerinin izlenmesi gibi hassas tarım görevlerini desteklemektedir (Wang et

al., 2020). Bu, meyve boyutu ve büyüme hızı hakkında bilgi sağlayarak optimum hasat zamanını belirlemeye yardımcı olmaktadır (Wang et al., 2020).

Tıbbi Görüntü Analizi: Kenar tespiti, tümör segmentasyonu (R. Pourreza et al., 2017) ve biyomedikal görüntülerin analizi (Ronneberger et al., 2015) dahil olmak üzere tıbbi görüntü işleme alanında yaygın uygulamalara sahiptir (Li et al., 2020; Muntarina et al., 2022). Kanserin üç boyutlu (3D) yüzey yapısının yeniden inşası ve hücrelerin ince taneli (fine-grained) özelliklerinin çıkarılması için derin öğrenme tabanlı kenar tespiti algoritmaları önerilmiştir (Li et al., 2020).

7.3. Dönüşümsel Uygulamalar (Real-Time ve Verimlilik)

Geleneksel yöntemler genellikle yavaş ve gürültüye karşı hassasken, Yapılandırılmış Ormanlar (Dollár & Zitnick, 2015) ve modern hafif CNN'ler (PiDiNet, BDCN) gibi DL tabanlı yöntemler, yeni gerçek zamanlı uygulamaların önünü açmıştır:

Gerçek Zamanlı Sistemler: Yapılandırılmış Ormanlar (Structured Forests - SE) gibi DL öncesi öğrenme tabanlı yaklaşımlar, gerçek zamanlı (real-time) performansa ulaşarak verimlilik açısından geleneksel operatörleri geride bırakmıştır (Dollár & Zitnick, 2015). HED (Xie & Tu, 2015) ve RCF (Liu et al., 2019) gibi DL modelleri de, hızlı çıkarım süreleri sunarak video segmentasyonu ve zamana duyarlı nesne tanıma (time-sensitive object recognition) görevleri için uygun hale gelmiştir (Xie & Tu, 2015; Dollár & Zitnick, 2015).

Görüntü Stilizasyonu ve Çeviri: Kenar detektörleri, görüntüden görüntüye çeviri (image-to-image translation) ve fotoğraf eskizleme (photo-sketching) gibi modern görevlerde de gereklidir (Soria et al., 2020).

Bu geniş uygulama yelpazesi, kenar tespitinin, yalnızca bir ön işlem olmaktan öteye geçerek, bilgisayarlı görü sistemlerinin karar verme ve yorumlama yeteneklerini doğrudan etkileyen hayati bir bileşen olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, kenar tespiti algoritmaları, geleneksel gradyan operatörlerinden başlayıp günümüzün karmaşık Transformer mimarilerine evrilerek, otonom sürüşten tıbbi görüntülemeye kadar geniş bir yelpazede bilgisayarlı görünün vazgeçilmez bir unsuru olmaya devam etmektedir. Gelecek çalışmaların, özellikle Transformer tabanlı mimarilerin hesaplama maliyetlerini düşürmeye ve az etiketli veri ile öğrenim (few-shot learning) yeteneklerini geliştirmeye odaklanması beklenmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmanın hazırlanmasında, ilgili çalışmaların kapsamlı bir şekilde gözden geçirilmesini ve literatür taramasını kolaylaştırmak amacıyla NotebookLM üretici yapay zekâ aracı kullanılmıştır. Gemini 3, metnin

okunurluğunu artırmak için gramer iyileştirmelerine yardımcı olmuştur. Ayrıca, sunulan Şekil 2'nin oluşturulması ve kavramsallaştırılması için Nano Banana Pro kullanılmıştır. Bu araçlar hazırlık sürecini desteklemiş olsa da yazar tüm içeriği titizlikle gözden geçirmiş, doğrulamış ve düzenlemiş olup, nihai taslağın doğruluğu, özgünlüğü ve bütünlüğü için tüm sorumluluğu kabul etmektedir.

Kaynakça

- Arbeláez, P., Maire, M., Fowlkes, C., & Malik, J. (2011). Contour detection and hierarchical image segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 33(5), 898–916.
- Babaud, J., Witkin, A. P., Baudin, M., & Duda, R. O. (1986). Uniqueness of the Gaussian kernel for scale-space filtering. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-8, 26–33.
- Basu, M. (2002). Gaussian-Based Edge-Detection Methods—A Survey. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews*, 32(3), 252–260.
- Berzins, V. (1984). Accuracy of laplacian edge-sdetectors. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 27(2), 195–210.
- Canny, J. (1986). A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 8(6), 679–698.
- Cha, Y. J., & Choi, W. (2017). Deep learning-based crack damage detection using convolutional neural networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 32(5), 361–378.
- Chen, L. C., Barron, J. T., Papandreou, G., Murphy, K., & Yuille, A. L. (2016). Semantic image segmentation with task-specific edge detection using CNNs and a discriminatively trained domain transform. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 4545–4554.
- Dollár, P., & Zitnick, C. L. (2015). Fast Edge Detection Using Structured Forests. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 37(8), 1558–1570.
- Dorafshan, S., Thomas, R. J., & Maguire, M. (2018). Comparison of deep convolutional neural networks and edge detectors for image-based crack detection in concrete. *Construction and Building Materials*, 186, 1031–1045.
- Ferrari, V., Fevrier, L., Jurie, F., & Schmid, C. (2008). Groups of adjacent contour segments for object detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 30(1), 36–51.
- Gupta, S., Arbeláez, P., & Malik, J. (2013). Perceptual organization and recognition of indoor scenes from RGB-D images. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 564–571.
- Gupta, S., Girshick, R., Arbeláez, P., & Malik, J. (2014). Learning rich features from RGB-D images for object detection and segmentation. In *Proceedings of the European Conference on Computer Vision*, 345–360.

- Hariharan, B., Arbeláez, P., Bourdev, L., Maji, S., & Malik, J. (2011). Semantic contours from inverse detectors. In *International Conference on Computer Vision*, 991–998.
- He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 770–778.
- He, J., Zhang, S., Yang, M., Shan, Y., & Huang, T. (2019). Bi-Directional Cascade Network for Perceptual Edge Detection. *arXiv preprint arXiv:1902.10903*.
- He, J., Zhang, S., Yang, M., Shan, Y., & Huang, T. (2020). Bi-directional cascade network for perceptual edge detection. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 3828–3837.
- Li, X., Jiao, H., & Wang, Y. (2020). Edge detection algorithm of cancer image based on deep learning. *Bioengineered*, 11(1), 693–707.
- Lim, J. J., Zitnick, C. L., & Dollár, P. (2013). Sketch Tokens: A Learned Mid-level Representation for Contour and Object Detection. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 3158–3165.
- Liu, Y., Cheng, M.-M., Hu, X., Wang, K., & Bai, X. (2017). Richer Convolutional Features for Edge Detection. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 3000–3009.
- Liu, Y., Cheng, M.-M., Hu, X., Bian, J.-W., Zhang, L., Bai, X., & Tang, J. (2019). Richer Convolutional Features for Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 41(8), 1939–1946.
- Liu, Y., Cheng, M.-M., Fan, D.-P., Zhang, L., Bian, J.-W., & Tao, D. (2020). Semantic Edge Detection with Diverse Deep Supervision. *International Journal of Computer Vision*, 130(1), 179–198.
- Long, J., Shelhamer, E., & Darrell, T. (2015). Fully convolutional networks for semantic segmentation. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 3431–3440.
- Marmanis, D., Schindler, K., Wegner, J. D., Galliani, S., Datcu, M., & Stilla, U. (2018). Classification with an edge: Improving semantic image segmentation with boundary detection. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 135, 158–172.
- Marr, D. & Hildreth, E. (1980). Theory of edge detection. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences*, 207(1167), 187–217.
- Meer, P., & Georgescu, B. (2001). Edge detection with embedded confidence. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 23(12), 1351–1365.

- Mitra Basu. (2002). Gaussian-Based Edge-Detection Methods—A Survey. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews*, 32(3), 252–260.
- Muntarina, K., Shorif, S. B., & Uddin, M. S. (2022). Notes on edge detection approaches. *Evolving Systems*, 13(1), 169–182.
- Pu, M., Huang, Y., Liu, Y., Guan, Q., & Ling, H. (2021). RINDNet: Edge detection for discontinuity in reflectance. *arXiv preprint arXiv:2103.00616*.
- Pu, M., Huang, Y., Liu, Y., Guan, Q., & Ling, H. (2022). EDTER: Edge detection with transformer. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1402–1412.
- Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015). U-net: convolutional networks for biomedical image segmentation. In *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention–MICCAI 2015: 18th International Conference*, 234–241.
- Soria, X., Riba, E., & Sappa, Á. (2020). Dense extreme inception network: Towards a robust CNN model for edge detection. In *Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision*, 1923–1932.
- Su, Z., Liu, W., Yu, Z., Hu, D., Liao, Q., Tian, Q., Pietikäinen, M., & Liu, L. (2021). Pixel difference networks for efficient edge detection. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 5117–5127.
- Wang, D., Li, C., Song, H., Xiong, H., Liu, C., & He, D. (2020). Deep learning approach for apple edge detection to remotely monitor apple growth in orchards. *IEEE Access*, 8, 2971524.
- Xie, S., & Tu, Z. (2015). Holistically-Nested Edge Detection. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 1395–1403.
- Yang, W., Chen, Y., Qin, H., Chen, X.-D., & Tao, X. (2025). Consistency-informed progressive learning and segment anything model for edge detection. *Applied Soft Computing Journal*, 181, 113487.
- Yu, Z., Feng, C., Liu, M.-Y., & Ramalingam, S. (2017). CASENet: Deep Category-Aware Semantic Edge Detection. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 5964–5973.
- Yuille, A. L., & Poggio, T. A. (1986). Scaling theorems for zero-crossings. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-8, 15–25.
- Ziou, D., & Tabbone, S. (1998). Edge detection techniques—An overview. *Pattern Recognition and Image Analysis*, 8, 537–559.
- Zou, Q., Zhang, Z., Li, Q., Qi, X., Wang, Q., & Wang, S. (2019). DeepCrack: Learning hierarchical convolutional features for crack detection. *IEEE Transactions on Image Processing*, 28(11), 5878–5891.

BÖLÜM 23

Peynir Üretiminde Alternatif Peynir Enzimlerinin Kullanımı ve Peynir Kalitesi Üzerine Olan Etkileri

Berke Boran Varlı¹ & Selda Bulca²

¹ Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, 0009-0004-8495-7228

² Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü, 0000-0001-7405-2872

1.GİRİŞ

Peynir üretiminde kullanılan temel enzim, kaynaklarda genel olarak "rennet" (peynir mayası) olarak belirtilmektedir. Rennet, süten kesilmemiş geviş getiren hayvanların (buzağılar, kuzular veya oğlaklar) dördüncü midesinden (abomasum) salgılanan, başta kimozin ve pepsin olmak üzere iki ana asidik proteolitik enzimin enzimatik preparatıdır (Garg & Johri, 2009). Saflaştırılmış süt pıhtılaştırma enzimi, ham rennet preparatlarının temel aktif bileşeni olup ticari kimozin (EC 3.4.23.4) olarak adlandırılmaktadır. Aspartik proteaz enzim sınıfında yer alan kimozin, diğer pıhtılaştırıcı enzimlerin karşılaştırılmasında referans enzim olarak kabul edilir. (Moschopoulou, 2011). Sütün doğal pH'sında (yaklaşık 6,8) kimozin tarafından gerçekleşen pıhtılaşmanın birincil enzimatik aşamasında, κ -kazein üzerinde bulunan Phe105–Met106 bağını kesilerek kazein misel yapısının kararlılığını bozulmaktadır. Bu hidroliz sonrası, ortamda kalsiyum iyonlarının bulunmasıyla birlikte kazein miselleri agregasyona uğrar ve pıhtı meydana gelir. “Rennet” kavramı tarihsel olarak buzağı şirdeninden elde edilen ekstraktlar için kullanılsa da, günümüzde stabil süt pıhtılaşması sağlayan farklı kaynaklara ait tüm enzim preparatlarını kapsayacak şekilde daha geniş bir anlam kazanmıştır. Bu nedenle FAO, kaynağın açıkça belirtilmesi için “hayvansal rennet”, “mikrobiyal rennet” gibi tanımlayıcı ön eklerin kullanılmasını önermektedir. Rennet (özellikle kimozin ve pepsin), peynir üretiminde ikili bir rol üstlenir: Sütü pıhtılaştırmanın yanı sıra, peynir olgunlaşması sırasında gerçekleşen proteolize katkıda bulunur. Ayrıca, küçük geviş getiren hayvanlardan (kuzu, oğlak) elde edilen geleneksel rennetler, içerdikleri lipolitik enzimler sayesinde olgunlaşma sırasında serbest yağ asitleri (FFA) salarak üretilen peynire özel duyu özellikler (lezzet, keskin tat) kazandırmasıyla da önemli bir rol oynar (Bezie & Regasa, 2019). Peynir altı suyunun (whey) fazla pıhtı kaybı olmadan drene edilmesini sağlamak için, peynirin yeterli sıklığa ulaşması (kesim zamanı) rennetin pıhtılaştırma aktivitesinin kritik bir teknolojik sonucudur (López, Lomholt, & Qvist, 1998).

Bu çalışmanın amacı, peynir üretiminde rennetin pıhtılaştırma aktivitesinin peynir altı suyunun (whey) verimli bir şekilde drene edilmesi üzerindeki etkilerini inceleyerek, optimal kesim zamanı ve pıhtı sıklığı koşullarını belirlemektir.

2. ALTERNATİF RENNET KAYNAKLARI

Peynir üretiminde geleneksel buzağı rennetine alternatif olarak çeşitli pıhtılaştırıcı enzimler geliştirilmiştir; bu alternatiflere olan ilgi, büyük ölçüde sürdürülebilirlik, etik kaygılar, hayvansal kaynak kıtlığı ve artan ticari talepler nedeniyle artmıştır. Özellikle son yıllarda peynir üretimindeki küresel artış ve buzağı renneti tedarikindeki düşüş, geleneksel hayvansal kaynaklı rennet enziminin fiyatını yükseltmiş ve araştırmacıları ve üreticileri alternatif arayışların teşvik etmiştir (Hirpara, Kele, & Patel, 2022). Alternatif rennet kaynakları arasında bitkisel, bakteriyel, maya-küf kaynaklı ve genetiği değiştirilmiş

mikroorganizmalardan elde edilen enzimler yer almaktadır. Genel olarak alternatif rennetlerin kullanımı, hayvancılığa olan bağımlılığı azaltarak çevresel etkiyi en aza indirmeye yardımcı olur (Buele, Villafuerte, Paucar, & Lara-Calle, 2024). Ayrıca bu alternatifler, üretim ortamında kimyasal ve biyolojik kirleticilere maruz kalma riskini azaltarak iş güvenliğini de artırır. Sonuç olarak, rennet kaynaklarının çeşitlendirilmesi, peynir üretimine etik, ticari ve sürdürülebilir bir yaklaşım getirmektedir.

2.1. Bitkisel Kaynaklı Rennetler

Peynir mayası ihtiyacını karşılamak amacıyla hayvan kaynaklı rennetlere alternatif olarak geliştirilmiş enzim preparatları arasında bitkisel kaynaklı rennetler yer almaktadır. Bu alternatif koagülantlara olan ilgi, küresel buzağı renneti kıtlığı ve artan fiyatlar ile birlikte, vejetaryenler ve dini nedenlerle hayvansal ürün tüketmeyen tüketicilerin taleplerini karşılama zorunluluğundan doğmuştur (Garg & Johri, 2009). Bitkisel rennetler, bitkinin kendisinden veya bitki kısımlarından elde edilen proteolitik enzimleri içerir. Tarihsel olarak, incir lateksi (*Ficus carica*) gibi bitkisel koagülantların süt pıhtılaştırmada kullanıldığı antik çağlardan beri bilinmektedir (Nicosia, Puglisi, Pino, Caggia, & Randazzo, 2022). Günümüzde incelenen veya kullanılan önemli bitkisel rennet kaynakları arasında devediken (Cynara cardunculus), enginar (Cynara scolymus), papaya (Carica Papaya), ananas (Ananas Comosus) ve acı portakal (Citrus aurantium) çiçekleri bulunmaktadır. Bitkisel rennetlerin temel işlevi sütü pıhtılaştırmak olsa da, pıhtılaştırma aktivitesi genellikle hayvansal rennetlere göre daha yavaştır (Pacifico, Caputo, Piccolella, & Mandrich, 2024).

2.1.1. Ficus Carica (İncir Lateksi)

İncir (*Ficus carica*) lateksi, peynir üretiminde geleneksel hayvansal rennete alternatif olarak kullanılan ve kullanımının antik döneme dayandığı önemli bir bitkisel koagülant kaynağıdır. Homeros'un *İlyada* eserinde incir suyunun sütü pıhtılaştırma özelliğine değinildiği ve M.Ö. 1.yüzyılda Lucius Junius Moderatus Columella'nın, *De Re Rustica* adlı tarım kitabında incir suyu gibi maddelerin pıhtılaştırıcı olarak kullanıldığı bildirilmiştir. (Nicosia, Puglisi, Pino, Caggia, & Randazzo, 2022). İncir lateksinde bulunan başlıca pıhtılaştırıcı enzim, sistein endopeptidaz sınıfından fisin (EC 3.4.22.3) olarak bilinmektedir. Fisin yalnızca *F. carica*'da değil, *Ficus glabrata* ve *Ficus elastica* gibi diğer *Ficus* türlerinde de mevcuttur ve bir incir meyvesinde (10–15 g) yaklaşık 150 mg fisin bulunabilmektedir. Bu enzim, 5,0–8,0 pH aralığında ve 45–55 °C sıcaklıklarda etkin bir şekilde çalışmaktadır. (Aktayeva, Akishev & Khassenov, 2018). Deneysel araştırmalar, incir sütü özütünün (fig milky sap) pıhtılaştırma aktivitesi açısından ticari hayvansal kaynaklı rennet ile karşılaştırılabilir seviyede olduğunu göstermiştir. Bu yüksek koagülasyon kapasitesi, incir özü kullanılarak üretilen yarı sert peynirlerde, hayvansal kaynaklı rennetle üretilen peynirlerde gözlenen teleme verimiyle (yaklaşık 70 g/500 mL süt) benzer sonuçlar elde edilmesini

sağlamıştır. (Pacifico, Caputo, Piccolella, & Mandrich, 2024). Bitkisel rennetlerin çoğunda gözlenen yüksek proteolitik aktivite (PA) incir sütü özütü için de geçerlidir. Bu durum, kazein proteinlerinin aşırı parçalanmasına yol açarak peynirin dokusal özelliklerini etkileyebilmekte ve acı tat ile verim kayıplarına sebep olabilmektedir. Yapılan in vitro deneylerde, incir sütü özütünün sığır serum albüminini (BSA) yaklaşık %50 oranında hidrolize ettiği ve bu değerin ticari hayvansal kaynaklı rennetinin %46'lık hidroliz oranına yakın olduğu belirlenmiştir (Pacifico, Caputo, Piccolella, & Mandrich, 2024). Bitkisel rennetlerin kullanımı, peynirlerin besin değerini de olumlu yönde etkileyebilir. İncir renneti ile üretilen peynirlerde, palmitik, oleik ve linoleik asit gibi serbest yağ asitleri (FFA) profili, kontrol grubu peynirle kıyaslandığında farklılık göstermiştir. (Pacifico, Caputo, Piccolella, & Mandrich, 2024). Ayrıca esansiyel bir ω -3 yağ asidi olan α -linolenik asit içeriği artmış ve bu durum, peynirin daha sağlıklı bir diyet için katkı sağlamasına imkân tanımıştır. (Pacifico, Caputo, Piccolella, & Mandrich, 2024). Sonuç olarak incir lateksi ve içerdiği fisin enzimi, güçlü süt pıhtılaştırma kapasitesi ve vejetaryen/etik uyumluluğu nedeniyle alternatif bir rennet kaynağı olarak önemli bir potansiyele sahiptir. Bununla birlikte, yüksek proteolitik aktiviteye bağlı olarak oluşabilecek tat ve doku kusurlarını önlemek için, kullanılan özüt miktarı ve pıhtılaşma süresi dikkatli bir şekilde optimize edilmelidir.

2.1.2. *Cynara Cardunculus* (Devedikeni)

Cynara cardunculus L. (devedikeni), alternatif bir süt pıhtılaştırıcı kaynağı olarak uzun bir tarihe sahiptir. Özellikle Portekiz ve İber Yarımadası'nın kurak ve taşlık bölgelerinde doğal olarak yetişen bu bitki, çiçeklerinden elde edilen özütleri sayesinde antik dönemlerden bu yana peynir üretiminde kullanılmaktadır. Günümüzde hâlâ Portekiz'de bazı coğrafi işaretli (PDO) peynirlerin üretiminde bitkisel bir koagülant olarak zorunlu bir rol üstlenmektedir. *C. cardunculus*'tan elde edilen enzimler, kardozinler (cardosins A ve B) olarak adlandırılan aspartik proteazlardır ve süt pıhtılaştırma sürecini başlatmak için, hayvansal rennetteki kimozen gibi, κ -kazein proteinindeki Phe105-Met106 bağımlı hidrolize etme yeteneğine sahiptirler (Roseiro, Barbosa, Ames, & Wilbey, 2003). İspanya ve Portekiz'de bu bitkisel pıhtılaştırıcı ile üretilen koyun sütü peynirleri (örneğin Serra da Estrela ve Serpa), özel tatları ve organoleptik özellikleri nedeniyle büyük değer görmektedir. Bu peynirler genellikle karakteristik yumuşak, kremi bir dokuya ve olgunlaştıkça keskin/hafif acı bir tada sahip olurlar (Gomes vd., 2019). Buna ek olarak, birçok bitkisel pıhtılaştırıcıda karşılaşılan önemli bir sorun, *Cynara cardunculus* özütlerinin çoğunlukla kimozenle karşılaştırıldığında daha yüksek ve daha az spesifik proteolitik aktivite (PA) göstermesidir. Bu artan PA, peynir pıhtısının zayıf olmasına, peynir veriminin düşmesine ve peynirde acı bir tat oluşmasına neden olabilecek kısa peptitlerin serbest kalmasına yol açabilir. Güncel araştırmalar, *Cynara cardunculus*'un farklı ekotiplerinden elde edilen özütlerin sütü

pıhtılaştırma aktivitesi (MCA), proteolitik aktivitesi (PA), jel sertliği ve potansiyel peynir verimi gibi teknolojik özelliklerde önemli farklılıklar gösterdiğini ortaya koymuştur (Gomes vd., 2019). Bu çeşitlilik, peynirin son kalitesini doğrudan etkileyebileceği için, belirli peynir türlerinin üretiminde en uygun ekotipin seçilmesi büyük önem taşır. Örneğin, yüksek MCA ve orta seviyede PA gösteren özütlerin, Torta del Casar gibi peynirlerde daha iyi kremsilik ve genel kabul edilebilirlik sağladığı rapor edilmiştir (Gomes vd., 2019). Ayrıca bitkisel rennet kullanımı, vejetaryen tüketicilere yönelik ürün geliştirme, çevreye duyarlı pazarlara hitap etme ve dini kısıtlamaları aşma gibi avantajlar da sunmaktadır.

2.1.3 *Cynara scolymus* (Enginar)

Enginar (*Cynara scolymus*), özellikle Akdeniz bölgesinde yaygın olarak bulunması ve göreceli olarak basit bir şekilde özütlenebilmesi nedeniyle, geleneksel hayvansal rennete alternatif olarak dikkat çeken bir bitkisel koagülanttır. Bitkinin kökleri, genç ve olgun yaprakları ile çiçekleri, sütü pıhtılaştırıcı özellik gösteren proteaz enzimlerini içerir. Bu enzimler, aspartik proteazlar sınıfına dahildir ve kardozinler (A ve B) ile sinarazlar olarak adlandırılan farklı fraksiyonlar halinde izole edilebilmektedir. (Bravo Bolívar, Pasini, Marzocchi, Ravagli, & Tedeschi, 2023). Çalışmalar, enginar çiçeği özütünün, Gouda tipi peynir üretiminde hayvansal rennetin yerine kullanılabileceğini göstermiş olup, özütün endüstriyel ölçekte kullanıma uygun bir sürede (yaklaşık 30 dakika) sütü pıhtılaştırdığı ve peynir veriminin hayvansal rennet ile elde edilen verime eşit olduğu tespit edilmiştir (Llorente, Obregón, Avilés, Caffini, & Vairo-Cavalli, 2014). Enginar (*Cynara scolymus*) özütleri kullanılarak üretilen peynirlerde, hayvansal rennetle yapılan peynirlerle kıyaslandığında kimyasal özellikler ve duyu kalite açısından belirgin bir farklılık gözlemlenmemiştir. Ayrıca, *C. scolymus* özütleri, İspanya’da korumalı menşe adı (PDO) ile tanınan geleneksel peynirlerden Queso Flor de Guía’nın üretiminde de tercih edilmektedir.

2.1.4 *Carica Papaya* (Papain)

Papain, geleneksel hayvansal rennetine alternatif olarak değerlendirilen bitkisel kökenli pıhtılaştırıcı enzimlerden biridir ve *Carica papaya* bitkisinin lateksinden elde edilen bir proteazdır. Sistein proteazları sınıfında yer alan bu enzim; geniş substrat seçiciliği, pH 5,0–7,0 aralığında ve yaklaşık 10–90°C arasında değişen sıcaklıklarda aktivitesini sürdürebilme gibi dikkat çekici özelliklere sahiptir. Günümüzde hayvansal rennet tedarikinin maliyetli olması ve piyasadaki talebi tam olarak karşılayamaması (yaklaşık %20–30 seviyesinde kalması), bitkisel kaynaklı enzimlere yönelik ilgiyi artırmıştır. (Li vd., 2022) Bu nedenle papain, özellikle süt ürünleri ve peynir üretimi de dahil olmak üzere birçok gıda işleme uygulamasında en sık kullanılan bitkisel proteolitik enzimlerden biri haline gelmiştir. Papainin peynir üretimindeki etkileri

incelendiğinde, bu enzimin sütü pıhtılaştırabilme özelliği sayesinde özellikle Endonezya’da üretilen yarı yumuşak Dangke peyniri gibi bazı geleneksel ürünlerde koagülant olarak kullanıldığı bilinmektedir (Aktayeva, Akishev, & Khassenov, 2018). Yapılan çalışmalarda, papainle üretilen model yumuşak peynirlerin olgunlaşma boyunca verim, nem oranı, pH değişimi, laktik asit bakterisinin oranı, peynirde doku özellikleri, proteolitik gelişim ve aroma bileşenleri açısından ayrıntılı şekilde değerlendirildiği görülmüştür (Li vd., 2022). Bulgular, papainin peynirin teknolojik ve duyuşal özellikleri üzerindeki etkisinin; kullanılan enzim miktarı, pıhtılaştırmanın gerçekleştiği sıcaklık ve koagülasyon süresi gibi üretim koşullarına doğrudan bağlı olduğunu göstermektedir. Örneğin, enzim dozunun ve pıhtılaştırma sıcaklığının yükselmesi, peynirde toplam serbest amino asit miktarının artmasına neden olmaktadır. Ayrıca daha fazla papain kullanımı ve daha uzun koagülasyon süresi, olgunlaşmanın başlangıcında bile daha sert bir yapıya sahip peynirlerin elde edilmesini sağlamaktadır. Papain dahil olmak üzere bitkisel proteazların ticari peynir üretimindeki genel dezavantajı, yüksek proteolitik aktiviteleri nedeniyle nihai üründe acı tada veya doku kusurlarına neden olabilme potansiyelidir. Kaynaklar, papainin bu dezavantajına rağmen, yumuşak peynir modelinde acılık açısından belirgin bir fark tespit edilmediğini göstermiştir. (Li vd., 2022). Sonuç olarak, papain, vejetaryen/halal/koşer gıda gereksinimlerini karşılaması ve enzimin asidik koşullara ve yüksek sıcaklıklara dirençli olması gibi avantajlarıyla alternatif bir pıhtılaştırıcı olarak potansiyel taşımaktadır.

2.2 Bakteriyel Kaynaklı Rennetler

Bakteri kaynaklı pıhtılaştırıcı enzimler, hayvansal rennete alternatif oluşturmak amacıyla geliştirilen mikrobiyal koagülantlar arasında yer almakta ve özellikle hayvansal kaynaklı mayanın yetersizliği ile etik kaygıların artması nedeniyle dikkat çekmektedir. Bu tür enzimler; gibi çeşitli mikroorganizmaların fermantasyon süreçleriyle üretilmekte olup, hayvansal içerik taşımadıkları için lakto-vejetaryen tüketiciler açısından uygun bir seçenek sunmaktadır. Her ne kadar kısa üretim döngüleri ve yüksek enzim verimi gibi avantajları bulunsun da, bakteriyel pıhtılaştırıcıların endüstriyel ölçekte yaygın kullanımına yönelik ticari başarı sınırlı kalmıştır. (Garg & Johri, 2009). Bunun başlıca nedeni, bakteriyel kaynaklı süt pıhtılaştırıcı enzimlerin yüksek düzeyde proteolitik aktivite göstermesi ve bu aktivitenin çoğu zaman yeterince özgül olmamasıdır. Bu kontrolsüz proteoliz, peynir teknolojisinde çeşitli problemlere yol açmaktadır. Özellikle peynir altı suyuna daha fazla yağ ve azot bileşeninin geçmesine bağlı olarak peynir verimi azalabilir. Ayrıca, olgunlaşma süresince kazeinlerin aşırı parçalanması acı tat oluşumuna neden olurken, pıhtı yapısında gevreklik veya aşırı yumuşama gibi doku bozukluklarının ortaya çıkmasına da sebep olabilir. Ayrıca, araştırılan birçok bakteri türünün, gıda kullanımına uygun olmadığı ve hatta bazılarının patojen olduğu bildirilmiştir. Bu zorluklar nedeniyle, şu anda hayvan rennetinin yerine geçebilecek ticari olarak mevcut bir bakteriyel

koagülant bulunmamaktadır ancak bakteriyel koagülantların, karışık enzim formülasyonlarında veya özel peynir türlerinde kısmi ikame olarak hala potansiyel taşıdığı düşünülmektedir (Garg & Johri, 2009). En yaygın kullanılan proteazlar; *Bacillus licheniformis*, *Bacillus subtilis* ve *Bacillus cereus* olarak bilinmektedir.

2.2.1 *Bacillus Licheniformis*

Bacillus licheniformis D3.11 suşu, otlaklarda yaşayan yakların bulunduğu alanlardan alınan toprak örneklerinden izole edilmiş ve süt pıhtılaştırıcı enzim üretme özelliği gösteren bir bakteri olarak tanımlanmıştır. Bu enzimin alternatif bir rennet kaynağı olarak değerlendirilmesi, özellikle Çedar peyniri üretimi üzerindeki etkilerinin araştırılması amacıyla yapılmıştır. (Zhang vd., 2022). Genel olarak bakteriyel koagülantlar, hayvansal rennete kıyasla daha yüksek ve özgül olmayan proteolitik aktiviteye sahip olduklarından, peynirde acı tat oluşumu ve verim kaybı gibi sorunlara yol açabilmektedir. Bununla birlikte, *Bacillus licheniformis* D3.11 kaynaklı süt pıhtılaştırıcı kullanılarak üretilen Çedar peynirinde (CDF grubu), ticari rennetle (CCF grubu) hazırlanan peynirlerle karşılaştırıldığında dikkat çekici mekanik özellikler gözlenmiştir. (Zhang vd., 2022). CDF grubundaki peynirlerde, olgunlaşma süresi boyunca sertlik, elastikiyet ve çiğnenebilirlik ölçümleri diğer gruplara kıyasla en düşük seviyelerde gözlenmiştir. Peynirler olgunlaştıkça tüm gruplarda sertlik artışı görülsede, CDF grubunun sertliği CCF grubuna göre hâlâ anlamlı derecede daha düşük kalmış ve bu durum, söz konusu enzimin daha yumuşak dokulu peynirler ürettiğini göstermiştir. (Zhang vd., 2022). Ayrıca, *Bacillus licheniformis* D3.11 kaynaklı süt pıhtılaştırıcı ile üretilen peynirlerin akışkanlık ve eriyebilirlik (füzibilite) özelliklerinin daha üstün olduğu belirlenmiştir. (Zhang vd., 2022). Buradan *Bacillus licheniformis* enzimi kullanılarak üretilen peynirlerin, ticari rennetle üretilen peynirlere göre daha az esnekliğe ve mekanik performansa sahip olduğunu, ancak daha iyi akışkanlık ve eriyebilirlik sergilediğini doğrulamaktadır. Sonuç olarak *Bacillus licheniformis*, yumuşak dokulu ve iyi eriyebilen peynirler için uygulama potansiyeli taşımaktadır.

2.2.2 *Bacillus Subtilis*

Bacillus subtilis, peynir endüstrisi bağlamında çift yönlü bir role sahiptir; bir yandan alternatif enzim üretimi için kullanılabilirken, diğer yandan işlenmiş peynirlerde kaliteyi bozan bir kontaminasyon olarak tanımlanmıştır (Catania vd., 2021). Peynir üretiminde yer alan *Bacillus subtilis*, spor oluşturabilme yeteneği sayesinde güçlü ısıl işlemlere dahi dayanabilen bir bakteri grubuna aittir ve sıklıkla vejetatif mikrobiyal kontaminasyon olarak izole edilmektedir. Bu tür bakteriler, proteaz üretme kapasiteleri sayesinde süt ürünlerinin tat ve dokusunu etkileyebilir; örneğin acı tat gelişimi veya sütte istenmeyen jel oluşumu gibi sorunlara neden olmaktadır. Ayrıca, *B. subtilis* izolatlarının yüksek düzeyde biyofilm oluşturma yetenekleri olduğu gözlenmiş ve bu durum peynir işleme

ekipmanlarında kalıcı kirlenmeye yol açarak üretim sürecini olumsuz yönde etkileyebildiği belirtilmiştir (Catania vd., 2021). *Bacillus subtilis*'in alternatif rennet enzimi olarak kullanım potansiyeli, özellikle ürettiği proteaz olan nattokinaz üzerinden değerlendirilebilir. Bu bakteri, ticari açıdan önemli bir serin proteaz olan nattokinazın üretimi için tercih edilmektedir. Üretimde maliyeti düşük bir besiyeri olarak peynir altı suyu (cheese whey) bileşenleri de başarıyla kullanılabilir. Nattokinaz aktivitesi, kazein parçalama yeteneği olarak tanımlanan kazeinolitik aktivite ile ölçülür. *B. subtilis* kültürleri, glikoz veya laktoz bazlı sentetik besiyerlerine kıyasla benzer düzeyde veya bazı parametrelerde glikoz bazlı besiyerden daha yüksek maksimum spesifik büyüme hızına ulaşabilmekte, bu da bakterinin peynir yan ürünlerindeki besinleri verimli bir şekilde kullanabildiğini göstermektedir. (Sahoo, Mahanty, Daverey, & Dutta, 2020). Her ne kadar bu enzimin kazeinolitik aktivitesi teknik olarak rennetin işleviyle ilişkilendirilebilse de, nattokinazın asıl fonksiyonu fibrin çözme (fibrinolitik) etkisidir ve literatürde peynir pıhtılaştırıcı olarak kullanımına dair detaylı bilgiler sınırlıdır.

2.2.3 *Bacillus Cereus*

Bacillus cereus, peynir üretiminde alternatif bir rennet enzimi olarak kullanılmaktan çok, süt ve süt ürünlerinde sık rastlanan bir kontaminant ve ciddi bir gıda güvenliği riski olarak değerlendirilmektedir. Bu bakteri, spor oluşturma yeteneği sayesinde pastörizasyon gibi ısı işlemlere direnç gösterebilir ve peynire geçebilmektedir (Tirloni vd., 2023). Her ne kadar teorik olarak pıhtılaştırıcı enzim aktiviteleri bulunabilse de, *B. cereus*'un peynir üretimi üzerindeki etkileri genellikle olumsuz ve yıkıcıdır. *B. cereus*, salgıladığı ekstraselüler proteolitik ve lipolitik enzimler yoluyla peynir ürünlerinin organoleptik özelliklerini olumsuz etkileyebilir ve raf ömrünü kısaltabilir. Araştırmalarda incelenen izolatların büyük bir kısmının (%98,9) kazein parçalama yeteneğine sahip olduğu ve tüm izole suşların proteaz üretebildiği belirlenmiştir ancak bu enzimatik aktivite, peynirde beklenen pıhtılaşmayı sağlamak yerine, acı tat oluşumu ve sütte tatlı pıhtılaşması (sweet curdling) gibi istenmeyen sorunlara yol açabilir. (Berthold-Pluta, Pluta, Garbowska, & Stefańska, 2019). Özetle, *B. cereus* peynirde pıhtılaştırıcı bir ajan olarak değil, yüksek proteolitik aktivitesi ve toksin üretimi nedeniyle ürün kalitesini düşüren ve potansiyel sağlık riskleri oluşturan bir mikroorganizma olarak değerlendirilmelidir. Bu nedenle, bu bakteri potansiyel bir alternatif enzim olarak değil, hijyen açısından kontrol edilmesi gereken bir tehlike olarak ele alınmalıdır.

2.3 Maya-Küf Kaynaklı Rennetler

Peynir üretiminde hayvansal rennete alternatif olarak geliştirilen mikrobiyal rennetler arasında önemli bir kısmı küf ve maya kaynaklıdır. Buzağı rennetine olan erişimin azalması ve artan ticari talepler, lakto-vejetaryen tüketicilere uygun bu pıhtılaştırıcıların araştırılmasını teşvik etmiştir. Ticari açıdan en yaygın ve

başarılı küf kaynaklı rennetler, *Rhizomucor pusillus* ve *Rhizomucor miehei* gibi filamentli mantarlardan elde edilen ekstraselüler enzimleri içerir (Hirpara, Kele, & Patel, 2022). Geleneksel küf kaynaklı rennetlerin bazı sınırlamaları vardır; bu enzimler genellikle buzağı rennetine kıyasla daha yüksek proteolitik aktivite gösterir. Bu durum, peynir olgunlaşırken acı tadın oluşmasına yol açabilecek kısa peptitlerin ortaya çıkmasına, lorun daha yumuşak olmasına ve peynir veriminin düşmesine neden olabilir. Ayrıca, *Rhizomucor miehei* ve *R. pusillus* kaynaklı mikrobiyal rennetler, buzağı rennetine göre daha yüksek termal dayanıklılığa sahiptir (Garg & Johri, 2009.)

2.3.1 *Rhizomucor Miehei*

Rhizomucor miehei, peynir üretiminde alternatif bir süt pıhtılaştırıcı olarak yaygın şekilde kullanılan bir küf kaynağıdır ve proteaz üretimi için katı hal fermentasyonu (SSF) yöntemleriyle çalışılmıştır. Bu mikroorganizmadan elde edilen proteaz, kuzunun dördüncü midesinden elde edilen geleneksel kimozone kıyasla tercih edilen bir ikame olarak öne çıkmaktadır. Bunun nedeni, enzimin kappa-kazein proteinindeki peptit bağlarını kimozone benzer şekilde kırabilmesi, yüksek MCA/PA oranına sahip olması, benzer kalsiyum gereksinimleri sunması ve peynir pıhtısında acı tat oluşumunu azaltmasıdır (Aljammas, Al Fathi, & Alkhalaf, 2018). *R. miehei* proteazı, İran UF Beyaz peyniri gibi çeşitli ticari peynir türlerinde sıkça kullanılmaktadır (Soltani, Boran, & Hayaloglu, 2016). Bu enzimin, farklı koagülantlarla (örneğin deve kimozone) birlikte uygulanması, peynirin mikroyapısı ve reolojik özellikleri üzerinde etkili olmaktadır (Soltani, Boran, & Hayaloglu, 2016). Genel olarak, *R. miehei* rennetinin tek başına veya yüksek dozlarda kullanımı, deve kimozoneine kıyasla daha yüksek proteolitik aktivite göstermektedir. Mikroyapı ve doku konusunda bakacak olursak yüksek oranda *R. miehei* içeren peynirlerde (örneğin, tamamen *R. miehei* kullanılan Peynir A), kazein ağ yapısı daha büyük küresel agregatlar ve geniş gözenekler sergilemiştir (Soltani, Boran, & Hayaloglu, 2016). Bu durum, proteolitik aktivitenin (PA) artmasıyla proteinlerin daha fazla parçalanmasına ve peynirin yapısının gevşemesine, dolayısıyla daha az sıkı bir protein ağı oluşmasına yol açmıştır. *R. miehei* konsantrasyonunun artışı, peynirin elastikiyetini (G' depolama modülü) belirgin şekilde azaltmış olup, yüksek *R. miehei* oranıyla üretilen peynirlerde G' (elastik) ve G'' (viskoz) modüllerinin daha düşük olduğu gözlemlenmiş, bu da bu peynirlerin daha yüksek deve kimozonei içeren ürünlere kıyasla daha yumuşak bir dokuya sahip olduğunu ortaya koymuştur (Soltani, Boran, & Hayaloglu, 2016). Özetle, *R. miehei*, geleneksel hayvansal rennetin önemli ve ticari açıdan başarılı bir alternatifidir; ancak yüksek proteolitik aktivitesi, peynirin reolojik ve mikroyapısal özelliklerini etkileyebilir ve özellikle daha yumuşak, daha az elastik dokular oluşmasına yol açabilir.

2.3.2 *Rhizomucor pusillus*

Rhizomucor pusillus, peynir üretiminde hayvansal rennete alternatif olarak kullanılan küf kaynaklı mikrobiyal koagülantlardan biridir. Bu mantar türü termofilik özellik gösterir ve yüksek sıcaklıklarda büyüebilmesi sayesinde, katı hal fermantasyonu (SSF) gibi yöntemlerle ticari ölçekte rennet üretiminde değerlendirilmektedir. *R. pusillus* kaynaklı enzimler, peynir endüstrisinde ticari açıdan değerli rennet ikameleri olarak kabul edilmektedir. (Omar, 2025). *R. pusillus* kaynaklı fungal rennet, peynir üretiminde genel olarak olumlu sonuçlar vermektedir. (Richardson, Nelson, Lubnow, & Schwarberg, 1967) Bu enzim, yüksek süt pıhtılaştırma aktivitesi ile proteolitik aktivite oranına (MCA/PA) sahiptir; bu özellik, daha yüksek peynir verimi ve geliştirilmiş ürün kalitesi ile ilişkilendirilmektedir. Ayrıca, *R. pusillus* renneti, peynir pıhtılaşması üzerindeki etkileri bakımından geleneksel hayvansal rennetle benzerlik göstermektedir. Proteolitik aktivite açısından fungal rennet, tripsin gibi istenmeyen proteolitik aktiviteye sahip enzimlere kıyasla daha uygun olsa da, pepsinden veya dana rennetinden daha yüksek proteolitik aktiviteye (PA) sahiptir. (Richardson, Nelson, Lubnow, & Schwarberg, 1967). Bu yüksek PA, kazein çözeltilisinde ve peynirde daha fazla non-protein nitrojen (NPN) artışına neden olur (Richardson, Nelson, Lubnow, & Schwarberg, 1967). Doku ve verim açısından yapılan süzme peynir denemelerinde, *Rhizomucor pusillus* suşları (örneğin ZDO-16), süt pıhtılaştırma/proteolitik aktivite (MCA/PA) oranları bakımından makul değerler göstermiştir. Bu oranlar, *Rhizomucor nainitalensis* suşlarına kıyasla daha düşük (örneğin 44,48 olmasına rağmen, yine de kaliteli bir peynir üretimine uygun kabul edilmektedir. (Khademi vd., 2013). Sonuç olarak, *R. pusillus* renneti, normal Brick, Cheddar, Pizza ve Parmesan peynirlerinin üretiminde başarılı bir şekilde kullanılmıştır. (Richardson, Nelson, Lubnow, & Schwarberg, 1967). Bu enzim, hayvansal rennete küresel olarak önemli bir alternatiftir ve toksin üretmeyen veya hastalık yapmayan türler arasında yer aldığı için gıda işleme süreçlerinde büyük önem taşımaktadır.

2.4 Genetiği Değiştirilmiş Mikroorganizma Kaynaklı Rennetler

Peynir üretiminde hayvansal rennet kullanımına ilişkin etik kaygılar, dini kısıtlamalar ve buzağı rennetine olan arzın azalması, alternatif enzim kaynaklarının araştırılmasını hızlandırmıştır. Bu kapsamda, genetik olarak modifiye edilmiş mikroorganizmalar tarafından üretilen pıhtılaştırıcılar önemli bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Peynir üreticilerinin ihtiyaçlarını karşılayan başlıca alternatifler arasında mikrobiyal ve rekombinant enzimler ile bitki kaynaklı enzimler yer almaktadır. Süt pıhtılaştırıcı enzimlerle ilgili yapılan araştırmalar, sadece hayvansal rennetin değil, aynı zamanda mikrobiyal ve rekombinant koagülanların da güvenilir ve etkili kaynaklar olduğunu göstermektedir (Tesfaw vd., 2024). Bu modern ikameler, geleneksel buzağı rennetine olan bağımlılığı azaltarak peynir üretiminde daha esnek ve

sürdürülebilir yaklaşımlar sunmaktadır. Rekombinant kimoziin, üretim sürecinde kaliteyi ve performansı kontrol altına almayı sağlayan genetik modifikasyon ile elde edilir (Hirpara, Kele, & Patel, 2022). Bu amaçla kullanılan mikroorganizmalar arasında *Escherichia coli*, *Kluyveromyces lactis* ve *Aspergillus niger* gibi türler bulunur. Rekombinant kimoziin, geleneksel mikrobiyal rennetlerde rastlanan yüksek proteolitik aktivite gibi ve bunun sonucu olarak peynirde oluşabilecek acı tat sorunlarını büyük ölçüde önler ve daha tutarlı bir ürün sağlar. Deneysel ve pilot ölçekli araştırmalar, rekombinant kimoziin ile üretilen Cheddar, Colby ve Manchego gibi peynirlerin verim, tat, aroma ve olgunlaşma özelliklerinin doğal enzimlerle üretilen peynirlerden farkının çok az olduğunu göstermektedir (Garg & Johri, 2009). Örneğin, *Kluyveromyces lactis* kaynaklı rekombinant kimoziin, %70 kimoziin içeren buzağı rennetine benzer pıhtılaşma performansı gösterirken, %55 kimoziin içeren buzağı rennetine göre daha hızlı pıhtılaşma sağlayabilmektedir (Hirpara, Kele, & Patel, 2022). Günümüzde, rekombinant buzağı kimoziini, ABD peynir üretiminde başlıca süt pıhtılaştırıcı olarak kullanılmakta ve endüstrinin etik ve sürdürülebilir üretim taleplerini karşılamasına katkı sağlamaktadır (Buele, Villafuerte, Paucar, & Lara-Calle, 2024). Rekombinant rennetin üretimine bakacak olursak da buzağı şirdenesinden elde edilen doğal kimoziin geninin modern biyoteknolojik yöntemlerle mikroorganizmalara aktarılmasıyla üretilir. Süreç, buzağı şirdenesinden kimoziin geninin izole edilmesiyle başlar. İzole edilen bu gen, bir plazmid vektörüne yerleştirilir ve daha sonra maya veya bakteri gibi seçilmiş mikroorganizmaların hücrelerine aktarılır. Genetik olarak değiştirilmiş bu mikroorganizmalar fermantasyon yoluyla kimoziin enzimi üretmeye başlar. Fermantasyon sonunda elde edilen kimoziin, saflaştırma işlemlerinden geçirilerek peynir üretiminde kullanılabilecek saflıkta bir enzim haline getirilir. Bu yöntemle üretilen rekombinant kimoziin, yapısal ve fonksiyonel olarak buzağı kimoziinine özdeş olduğu için peynir teknolojisinde doğal rennete güvenilir bir alternatif olarak kullanılmaktadır. Ayrıca stabilitesi yüksek, proteolitik yan aktiviteleri düşük olduğu için peynir kalitesinde daha kontrollü ve öngörülebilir sonuçlar verir.

3.ALTERNATİF RENNET ENZİMLERİNİN PEYNİRİN TEKNOLOJİK VE DUYUSAL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Alternatif pıhtılaştırıcı kaynaklar bitkisel, mikrobiyal ve küf-maya kaynaklı olabilirler. Etik kaygılardaki artış, hayvansal rennet arzındaki dalgalanmalar ve BSE benzeri güvenlik endişeleri nedeniyle giderek daha fazla ilgi görmektedirler. Bu alternatiflerin peynir teknolojisi ve duyusal kalite üzerindeki etkileri, temel olarak süt pıhtılaştırma aktivitesi (MCA) ile toplam proteolitik aktivite (PA) arasındaki ilişkiyle şekillenir (Nicosia, Puglisi, Pino, Caggia, & Randazzo, 2022). Bitkisel rennetler ile geleneksel küf kaynaklı mikrobiyal koagülanlar genellikle hayvansal rennete kıyasla daha yüksek PA gösterir (Garg & Johri, 2009). Bu durum, peynir altı suyuna daha fazla protein ve yağ geçişi nedeniyle verim

kaybına yol açabileceği gibi, kazeinlerin aşırı parçalanması sonucu ortaya çıkan kısa peptitlerin neden olduğu acılık gibi istenmeyen duyuusal hatalara da sebep olabilir. Teknolojik açıdan değerlendirildiğinde, kullanılan rennetin türü ile uygulanan enzim miktarı, peynirin hem yapısal bütünlüğünü hem de reolojik davranışlarını doğrudan belirleyen temel faktörlerdendir. Düşük pH koşullarında kalsiyum iyonlarının daha aktif hale gelmesi, kazein ağının daha hızlı sertleşmesini sağlayarak jel oluşum hızını artırmaktadır (López, Lomholt, & Qvist, 1998).

Alternatif mikrobiyal rennetler kullanıldığında ise, genellikle daha yüksek proteolitik aktivite (PA) göstermeleri sebebiyle oluşan pıhtının daha yumuşak bir doku sergilediği bildirilmektedir (Hirpara, Kele, & Patel, 2022). Nitekim *Bacillus licheniformis* D3.11 kökenli koagülaz ile üretilen Çedar peynirlerinde, ticari rennetle yapılanlara kıyasla olgunlaşma boyunca sertlik, elastikiyet ve çiğnenebilirlik değerlerinin daha düşük kalması, bu enzimin daha gevşek ve açık bir protein ağı oluşturduğunu göstermiştir (Zhang vd., 2022). Bu daha gevşek yapı, söz konusu enzimi eriyebilirlik ve akışkanlık açısından daha iyi performans gösteren peynirlerin üretiminde potansiyel bir seçenek haline getirmektedir. Benzer şekilde, *Rhizomucor miehei* proteazının UF Beyaz peynirlerde yüksek oranlarda kullanımı, deve kimozi ile üretilen peynirlerde gözlenen kompakt mikrostrüktürün aksine, daha zayıf bağlanmış ve daha yumuşak bir protein matrisi oluşturmasıyla ilişkilendirilmiştir (Soltani, Boran, & Hayaloglu, 2016). Duyusal açıdan en kritik sorunlardan biri olan acılık, özellikle hidrofobik amino asit içeren kısa peptitlerin birikmesiyle bağlantılıdır. Bu tür peptit oluşumu, birçok bitkisel pıhtılaştırıcıda (örneğin incir lateksi – *Ficus carica*) ve bazı geleneksel mikrobiyal rennetlerde daha sık görülmektedir. Bununla birlikte, *Bacillus subtilis* MK775302 kaynaklı ve kısmen saflaştırılmış MCE kullanılarak üretilen UF beyaz yumuşak peynirlerde, 28 günlük depolama sonunda bile acı tat gelişmediği bildirilmiştir (Wehaidy vd., 2023). Üstelik bu peynirler, ticari rennetle üretilen kontrollere kıyasla daha yüksek duyuusal beğeni puanları almıştır (Wehaidy vd., 2023). Ayrıca, bazı geleneksel mikrobiyal rennetlerin yüksek ısıl dayanıklılığı nedeniyle peynir altı suyu işleme aşamalarında teknolojik zorluklara yol açabileceği belirtilmektedir (Garg & Johri, 2009).

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Alternatif pıhtılaştırıcıların kullanımına yönelik ilgi, dünya genelinde peynir tüketiminin artması, hayvansal rennet kaynaklarının sınırlı ve maliyet açısından değişken olması ile helal-vejetaryen gibi etik ve diyet tercihlerinin önem kazanması nedeniyle giderek büyümüşür. Bitkisel, mikrobiyal ve küf-maya kökenli bu koagülantlar, üretimde sürdürülebilirliği destekleyerek geleneksel hayvansal rennete olan bağımlılığı azaltmaktadır. Ayrıca, üretim tesislerinde çalışanların kimyasal veya biyolojik kontaminantlara maruz kalma riskini düşürmeleri sayesinde iş sağlığı ve güvenliği açısından da avantaj

sağlayabilmektedirler. Alternatif rennetlerin peynirde oluşturduğu kalite özellikleri, çoğunlukla süt pıhtılaştırma kapasitesi (MCA) ile genel proteolitik aktivite (PA) arasındaki oranın ne kadar dengeli olduğuna bağlıdır. Buzağı kimozi, yüksek özgüllüğü sayesinde düşük PA gösterdiği için genellikle ideal kabul edilir. Alternatif pıhtılaştırıcılarda ise MCA/PA oranının daha yüksek olması, daha kontrollü bir pıhtılaşma ve daha iyi ürün kalitesi açısından arzu edilir. Birçok bitkisel kaynaklı ya da klasik mikrobiyal rennet, buzağı renetine kıyasla daha fazla proteolitik aktivite sergiler. Bu yüksek PA düzeyi, olgunlaşma boyunca kazeinlerin aşırı parçalanmasına neden olarak hem üretim performansında kayıplara hem de duysal açıdan istenmeyen sonuçlara (örneğin acı tat veya doku bozulmaları) yol açabilir.

Acı tat oluşumuna baktığımızda proteolitik aktivitenin aşırı yüksek olması, hidrofobik özellikte kısa peptitlerin birikimine yol açarak peynirde istenmeyen acı tatların ortaya çıkmasına neden olabilir. Örneğin, *Rhizomucor miehei* kaynaklı enzimlerle üretilen bazı peynirlerde bu tür bir acılık eğilimi bildirilmiştir (Roseiro, Barbosa, Ames, & Wilbey, 2003). Bitkisel pıhtılaştırıcılarda da benzer bir risk bulunmakla birlikte, enzimin kullanım dozunun dikkatle ayarlanması ve tuzlama aşamasının uzatılması (örneğin Gouda tarzı peynirlerde yaklaşık 40 saatlik tuzlama uygulanması gibi) bu olumsuzluğu önemli ölçüde azaltabilir veya tamamen ortadan kaldırabilir (Pacifico, Caputo, Piccolella, & Mandrich, 2024).

Doku ve verim açısından proteolitik aktivitenin yüksek olması, pıhtının daha gevşek bir yapı kazanmasına ve peynir dokusunun yumuşaması ile elastikiyetinin azalmasına yol açar. Bu gevşek yapı, peynir altı suyuna daha fazla yağ ve azot bileşeninin geçmesine neden olur; dolayısıyla toplam peynir verimi düşer. Nitekim *Bacillus licheniformis* D3.11 kaynaklı enzimin kullanıldığı Çedar peynirlerinde, sertlik ve çiğnenebilirlik değerlerinin en düşük seviyede olduğu, buna karşılık peynirin daha iyi akışkanlık ve erime özellikleri sergilediği rapor edilmiştir (Zhang vd., 2022). Benzer şekilde, *Rhizomucor miehei* proteazının yüksek dozlarda kullanıldığı UF Beyaz peynirlerde protein ağının daha az sıkı olduğu ve bunun son ürünün daha yumuşak bir dokuya sahip olmasına neden olduğu görülmüştür (Soltani, Boran, & Hayaloglu, 2016). Ekonomik açıdan ise enzim üretiminde maliyetlerin azaltılması amacıyla, besin içeriği yüksek endüstriyel yan ürünlerin fermentasyon ortamı olarak değerlendirilmesi giderek daha fazla önem kazanabilir. Özellikle peynir altı suyu (cheese whey), *Bacillus subtilis* gibi mikroorganizmaların büyümesi için uygun bir substrat oluşturarak, nattokinaz gibi ticari değeri yüksek enzimlerin düşük maliyetli üretimine olanak sağlayan ekonomik bir alternatif ortam görevi görebilir (Sahoo, Mahanty, Davey, & Dutta, 2020).

Alternatif rennetler, artan piyasa taleplerini karşılamak ve hayvansal rennet tedarikindeki sınırlamaları aşmak için kritik bir rol oynamaktadır. Rekombinant kimozi kalite ve tutarlılık açısından altın standart olarak kabul edilirken, bitkisel

ve geleneksel mikrobiyal rennetler yüksek proteolitik aktivitenin (PA) yol açtığı kalite sorunlarıyla başa çıkmak zorundadır. Bu nedenle, kaliteyi artırmak için protein mühendisliği gibi tekniklerle mikrobiyal rennetlerin yapı ve fonksiyon özellikleri buzağı kimozi ile uyumlu hâle getirilebilir. Ayrıca, enzim konsantrasyonu, pH kontrolü ve tuzlama gibi peynir üretim parametrelerinin titizlikle ayarlanması, acı tat ve düşük verim riskini azaltmak için gereklidir. Bitkisel kaynaklar, örneğin Cynara (enginar/kardonda), yüksek bulunabilirlik ve etik uygunluk açısından endüstriyel potansiyel sunarken, doğal kompozisyon değişkenliği endüstriyel uygulamayı zorlaştırabilir; bu nedenle ekstraksiyon ve saflaştırma yöntemlerinin standardize edilmesi önemlidir. Alternatif rennetlerin duyuşal kabulünü sağlamak ve geleneksel renneti ikame etme fizibilitesini doğrulamak için ileri düzey mikrobiyolojik ve duyuşal araştırmalar ile kontrollü deneysel denemeler gereklidir. Ayrıca, Türkiye ve Kazakistan gibi yerel pazarlarda yerli enzim üretimi, gıda güvenliğini artırmak ve ithalata olan bağımlılığı azaltmak açısından stratejik bir hedef olarak öne çıkmaktadır (Aktayeva, Akishev & Khassenov, 2018).

5. REFERANSLAR

- Aktayeva, S., Akishev, Z., & Khassenov, B. (2018). Proteolytic enzymes in cheese making. *Eurasian Journal of Applied Biotechnology*, (1). <https://doi.org/10.11134/btp.1.2018.2>
- Aljammas, H. A., Al Fathi, H., & Alkhalaf, W. (2018). Study the influence of culture conditions on rennin production by *Rhizomucor miehei* using solid-state fermentations. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 16(1), 213–216. <https://doi.org/10.1016/j.jgeb.2017.10.004>
- Bezie, A., & Regasa, H. (2019). The role of starter culture and enzymes/rennet for fermented dairy products manufacture: A review. *Nutri Food Science International Journal*, 9(2). <https://doi.org/10.19080/NFSIJ.2019.09.555756>
- Berthold-Pluta, A., Pluta, A., Garbowska, M., & Stefańska, I. (2019). Prevalence and toxicity characterization of *Bacillus cereus* in food products from Poland. *Foods*, 8(7), 269. <https://doi.org/10.3390/foods8070269>
- Bravo Bolívar, M. S., Pasini, F., Marzocchi, S., Ravagli, C., & Tedeschi, P. (2023). Future perspective and technological innovation in cheese making using artichoke (*Cynara scolymus*) as vegetable rennet: A review. *Foods*, 12(16), 3032. <https://doi.org/10.3390/foods12163032>
- Buele, J., Villafuerte, M., Paucar, S., & Lara-Calle, A. (2024). Impact of different types of rennet on sustainability and safety in cheese production. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1434, 012008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1434/1/012008>
- Catania, A. M., Civera, T., Di Ciccio, P. A., Grassi, M. A., Morra, P., & Dalmasso, A. (2021). Characterization of vegetative *Bacillus cereus* and *Bacillus subtilis* strains isolated from processed cheese products in an Italian dairy plant. *Foods*, 10(11), 2876. <https://doi.org/10.3390/foods10112876>
- Garg, S. K., & Johri, B. N. (1994). Rennet: Current trends and future research. *Food Reviews International*, 10(3), 313–355. <https://doi.org/10.1080/87559129409541005>
- Gomes, S., Belo, A. T., Alvarenga, N., Dias, J., Lage, P., Pinheiro, C., Pinto-Cruz, C., Brás, T., Duarte, M. F., & Martins, A. P. L. (2019). Characterization of *Cynara cardunculus* L flower from Alentejo as a coagulant agent for cheesemaking. *International Dairy Journal*, 91, 178–184. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2018.09.010>
- Hirpara, P., Kele, V. D., & Patel, D. (2022). Rennet and alternative: A review. <https://doi.org/10.47531/SC.2022.38>
- Khademi, F., Abachi, S., Mortazavi, A., Ehsani, M. A., Tabatabaei, M. R., & Malekzadeh, F. (2013). Screening and isolation of substitute-rennet producing thermophilic phycomycetes, by modified Warcup method and

improved selective medium. *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 2(2), 30–37.

- Li, L., Chen, H., Lü, X., Gong, J., & Xiao, G. (2022). Effects of papain concentration, coagulation temperature, and coagulation time on the properties of model soft cheese during ripening. *LWT*, 161, 113404. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113404>
- Llorente, B. E., Obregón, W. D., Avilés, F. X., Caffini, N. O., & Vairo-Cavalli, S. (2014). Use of artichoke (*Cynara scolymus*) flower extract as a substitute for bovine rennet in the manufacture of Gouda-type cheese: Characterization of aspartic proteases. *Food Chemistry*, 159, 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.03.007>
- López, M. B., Lomholt, S. B., & Qvist, K. B. (1998). Rheological properties and cutting time of rennet gels: Effect of pH and enzyme concentration. *International Dairy Journal*, 8(4), 289–293. [https://doi.org/10.1016/S0958-6946\(98\)00055-7](https://doi.org/10.1016/S0958-6946(98)00055-7)
- Moschopoulou, E. (2011). Characteristics of rennet and other enzymes from small ruminants used in cheese production. *Small Ruminant Research*, 101(1–3), 188–195. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2011.09.039>
- Nicosia, F. D., Puglisi, I., Pino, A., Caggia, C., & Randazzo, C. L. (2022). Plant milk-clotting enzymes for cheesemaking. *Foods*, 11(6), 871. <https://doi.org/10.3390/foods11060871>
- Omar, M. M. (2025). Isolation and identification of novel strain *Rhizomucor miehei* produces acid protease as a rennet substitute by solid state fermentation and use soft cheese-making. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1449, 012155. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1449/1/012155>
- Pacifico, S., Caputo, E., Piccolella, S., & Mandrich, L. (2024). Exploring new fruit- and vegetable-derived rennet for cheese making. *Applied Sciences*, 14(6), 2257. <https://doi.org/10.3390/app14062257>
- Richardson, G. H., Nelson, J. H., Lubnow, R. E., & Schwarberg, R. L. (1967). Rennin-like enzyme from *Mucor pusillus* for cheese manufacture. *Journal of Dairy Science*, 50(7), 1066–1072. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(67\)87566-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(67)87566-0)
- Roseiro, L. B., Barbosa, M., Ames, J. M., & Wilbey, R. A. (2003). Cheesemaking with vegetable coagulants-the use of *Cynara L.* for the production of ovine milk cheeses. *International Dairy Technology*, 56(2), 76–85. <https://doi.org/10.1046/j.1471-0307.2003.00080.x>
- Sahoo, A., Mahanty, B., Daverey, A., & Dutta, K. (2020). Nattokinase production from *Bacillus subtilis* using cheese whey: Effect of nitrogen supplementation and dynamic modelling. *Journal of Water Process Engineering*, 38, 101533. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101533>

- Soltani, M., Boran, O. S., & Hayaloglu, A. A. (2016). Effect of various blends of camel chymosin and microbial rennet (*Rhizomucor miehei*) on microstructure and rheological properties of Iranian UF White cheese. *LWT - Food Science and Technology*, 68, 724–728. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.01.028>
- Tesfaw, A. T., Sewmehon, Y. M., Tegegne, A. T., Alemu, G. B., Mersha, N. T., Yohannes, T. G., Negash, A. W., & Jiru, T. M. (2024). Exploring cheese production enzymes from various plants as an alternative to calf rennet. *Discover Food*, 4, Article 141. <https://doi.org/10.1038/s41538-024-00141-0>
- Tirloni, E., Bernardi, C., Celandroni, F., Mazzantini, D., Massimino, M., Stella, S., & Ghelardi, E. (2023). Prevalence, virulence potential, and growth in cheese of *Bacillus cereus* strains isolated from fresh and short-ripened cheeses sold on the Italian market. *Microorganisms*, 11(2), 521. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020521>
- Wehaidy, H. R., Abdel-Naby, M. A., Kholif, A. M. M., Elaaser, M., Bahgaat, W. K., & Abdel Wahab, W. A. (2023). The catalytic and kinetic characterization of *Bacillus subtilis* MK775302 milk clotting enzyme: Comparison with calf rennet as a coagulant in white soft cheese manufacture. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 21(1), 61. <https://doi.org/10.1186/s43141-023-00513-w>
- Zhang, Z., Cao, Y., Wang, Y., Qiao, H., & Zhang, W. (2022). Effect of *Bacillus licheniformis* D3.11 milk-clotting enzyme on texture properties of Cheddar cheese. *Journal of Dairy Science and Technology*, 45(2), 1–7. DOI: 10.7506/rykxyjs1671-5187-20220117-006

BÖLÜM 24

Mikroabrazyon

Yılmaz Küçük¹

¹ Doç. Dr., Bartın University, Engineering & Architecture and Design Faculty,
Department of Mechanical Engineering, Bartın, Türkiye. ORCID: 0000-0002-7559-8794

1. GİRİŞ

Triboloji, iki yüzeyin birbirine temas ettiği ve bağıl hareket yaptığı sistemlerde sürtünme, aşınma ve yağlama olaylarını inceleyen bilim dalıdır (Archard, 1953). Makine elemanlarının ömrünü, enerji verimliliğini ve güvenilirliğini doğrudan etkilediği için mühendislikte kritik bir öneme sahiptir. Aşınma, malzemelerin yüzeylerinin mekanik etkileşimler sonucunda kademeli olarak malzeme kaybına uğraması sürecidir ve endüstriyel arızaların önemli bir nedenidir. Dünya genelindeki enerji tüketiminin önemli bir kısmı sürtünme kaynaklı kayıplara bağlanırken, birçok makine elemanının hizmet ömrü aşınma ile sınırlıdır (Zlatareva vd., 2025).

Aşınma mekanizmaları oldukça çeşitlidir ve genellikle sürtünme koşulları, temas geometrisi, malzeme özellikleri ve çevresel faktörlere bağlı olarak farklılık gösterir. Başlıca aşınma türleri arasında yapışma aşınması (adhesive wear) ve aşındırıcı aşınma (abrasive wear) bulunur. Yapışma aşınması, temas eden yüzeyler arasında atomik düzeyde bağların oluşması ve bu bağların kopması sonucu meydana gelen malzeme transferi ile karakterizedir. Özellikle metalik malzemelerde, yüksek normal yük altında düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip yüzeylerin temasıyla mikroskobik kaynak bölgeleri oluşabilir ve bu kaynakların kopmasıyla malzeme bir yüzeyden diğerine transfer olur. Aşındırıcı aşınma ise, daha sert partiküllerin veya yüzey pürüzlülüklerinin yumuşak yüzeyi kazınması, kesmesi veya yorması sonucu meydana gelir. Bu partiküller dışarıdan gelebilir (üç cisim aşınması) veya malzemeden kopmuş aşınma parçacıkları olabilir (iki cisim aşınması) (Cozza, 2019). Bu mekanizmalar, parça ömrünü kısaltır, bakım maliyetlerini artırır ve sistem verimliliğini düşürür.

Bu tür aşınma mekanizmalarının anlaşılması ve kontrolü için doğru ve güvenilir aşınma test yöntemleri geliştirilmiştir. Geleneksel aşınma testleri (örneğin, pin-on-disk, block-on-ring), genellikle makro ölçekli uygulamalar ve büyük hacimli malzeme aşınmasını değerlendirmek için tasarlanmıştır. Ancak, ince film kaplamalar, mikro-elektro-mekanik sistemler (MEMS) veya hassas mühendislik bileşenleri gibi mikro ölçekli uygulamalarda, malzeme hacmi ve film kalınlığı çok küçük olduğundan, bu geleneksel yöntemler yetersiz kalabilmektedir. Geleneksel testlerde film/alt tabaka kombinasyonunun aşınma ömrünü ölçmek mümkün olsa da, filmin kendisinin aşınma direnci veya alt tabaka etkisi olmadan saf film aşınma davranışı hakkında detaylı bilgi sağlamazlar (Adachi vd., 2003).

Bu boşluğu doldurmak ve özellikle ince film kaplamaların, yüzey modifiye edilmiş katmanların ve diğer mikro ölçekli malzemelerin aşınma davranışını karakterize etmek amacıyla “mikroabrazyon testi” (microabrasion test) geliştirilmiştir. En yaygın mikroabrazyon testi varyantlarından biri “bilya-çukur

testi” (ball-crater test) olarak bilinir. Bu yöntem, aşındırıcı partiküller içeren bir süspansiyonun, numuneye belirli bir yük altında temas eden döner bir bilya arasına beslenmesi prensibine dayanır. Aşındırıcı süspansiyonun etkisiyle, numune yüzeyinde ve/veya kaplama üzerinde küresel bir aşınma çukuru oluşur. Testin sonunda oluşan çukurun geometrisi (çapı ve derinliği) ölçülerek malzeme kaybı veya kaplama kalınlığı hassas bir şekilde belirlenir. Bu test, düşük normal yükler ve kısa test süreleri ile karakterizedir, bu da onu ince filmler ve yüzey işlemleri için ideal kılar. Böylece, yüzey katmanlarının veya ince filmlerin aşınma direnci, alt tabaka etkileri en aza indirilerek hassas bir şekilde değerlendirilebilir (Leroy vd., 2005).

Mikroabrazyon testinin ince film kaplamalar, metalik malzemeler ve seramik malzemeler üzerindeki önemi büyüktür. Özellikle, PVD (Physical Vapor Deposition) ve CVD (Chemical Vapor Deposition) gibi yöntemlerle üretilen sert kaplamaların (TiN, AlCrN, DLC vb.) performansının değerlendirilmesinde önemli bir araçtır (Batista vd., 2002; Silva vd., 2014). Yöntem, düşük malzeme hacmi gerektirmesi, hızlı sonuç vermesi ve aşınma hacmini hassas bir şekilde ölçebilmesi gibi avantajlar sunar. Bu sayede, kaplama tasarımından malzeme seçimine kadar birçok mühendislik kararının bilimsel temellerle desteklenmesine olanak tanır. Endüstriyel alanda, kesici takımlar, medikal implantlar, otomotiv parçaları ve havacılık bileşenleri gibi yüksek performanslı uygulamalar için geliştirilen yeni malzemelerin ve yüzey işlemlerinin tribolojik performansını belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Pinto vd., 2023). Akademik çevrelerde ise, aşınma mekanizmalarının temelini anlamak, yeni malzeme sistemlerinin tribolojik davranışlarını araştırmak ve teorik modelleri doğrulamak için değerli bir deneysel araçtır.

Bu derleme çalışması, mikroabrazyon test metodunun temel prensiplerini, sert kaplamaların mikroabrazyon aşınma performansları üzerine literatürde son yirmi yılda yapılmış çalışmaları özetlemeyi amaçlamaktadır.

2. MİKROABRAZYON TEST YÖNTEMİ

2.1. Mikroabrazyon Test Metodu (Ball-cratering method)

Malzemelerin ve özellikle ince film kaplamaların aşınma performansının değerlendirilmesi, tribolojik araştırmaların ve mühendislik uygulamalarının kritik bir parçasını oluşturmaktadır. Geleneksel aşınma testleri, büyük numuneler ve yüksek aşınma oranları için uygunken, mikro ölçekte yüzey modifikasyonları, ince filmler ve kaplamalar gibi hassas yapılar için özel test metodlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, mikroabrazyon testi, yani bilye-krater testi, düşük aşınma oranlarını ve ince tabakaların davranışını incelemek için yaygın olarak kullanılan, standartlaştırılmış ve oldukça etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır.

2.2. Testin Prensibi ve Düzenegi

Mikroabrazyon testi, bir numunenin yüzeyinde kontrollü ve tekrarlanabilir bir şekilde küçük bir krater oluşturarak aşınma direncini değerlendirme prensibine dayanmaktadır. Test düzenegi şematik olarak incelendiğinde, temel olarak bir bilye, bir numune tutucu, bir yükleme sistemi ve bir aşındırıcı süspansiyon besleme mekanizmasından oluşur. Test sırasında, belirli bir çapta (genellikle 10-25.4 mm) sert bir bilye (örn. paslanmaz çelik, tungsten karbür, alümina), sabit bir eksen etrafında dönme hareketi yapar. Numune, bilyenin altına belirlenmiş bir normal kuvvet (yük) ile bastırılır. Bilye ile numune arasına, genellikle silika (SiO_2), alümina (Al_2O_3) veya silisyum karbür (SiC) gibi aşındırıcı partiküller içeren bir sıvı süspansiyon (slurry) sürekli olarak damlatılır (Andrade vd., 2009).

Bilyenin dönme hareketi, numuneye uygulanan normal yük ve aşındırıcı partiküllerin etkisiyle numune yüzeyinde karakteristik, pürüzsüz kenarlı, küresel bir krater oluşur. Bu krater, bilyenin hareket yolu boyunca malzemeyi mikroyorulma, mikrokese ve mikropulluklama (microploughing) gibi mekanizmalarla aşındırması sonucu meydana gelir. Test süresi ve bilye dönme hızı, istenen krater derinliğine ve dolayısıyla aşınma miktarına ulaşmak için ayarlanabilir. Test tamamlandıktan sonra, numune üzerindeki kraterin çapı ve derinliği, genellikle optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM) veya profilometre gibi yüksek çözünürlüklü görüntüleme ve ölçüm cihazları kullanılarak belirlenir. Bu geometrik ölçümler, aşınma hacmi ve aşınma hızı gibi nicel tribolojik parametrelerin hesaplanmasında temel veri sağlar.

Mikroabrazyon testi, kullanılan bilyenin (top) hareketine bağlı olarak iki ana modda uygulanmaktadır.

2.2.1 Serbest top (Free-ball) yöntemi

Bu test türünde bilye serbest ağırlığı ile eğimli bir yüzeye sabitlenmiş numune yüzeyine eğime bağlı yaslanmış olarak durmakta iken diğer temas noktaları ise üzerine kanal açılmış bir tahrik milidir. Bu mil ve eğimli numune tutucu yüzey arasında kabaca 3 noktadan temas halindeki dönen bilye üzerine belirli periyotlar ve miktardaki aşındırıcı içeren su damlatılır. Böylece aşındırıcılı su dönen bilye hareketi ile bilye-numune ara yüzeyine taşınarak aşındırma işlemi gerçekleştirilir. Bilye dönme hareketi doğrudan değil sürtünme yoluyla sağlandığından bilye dönme hızında kesinlik yoktur. Normal yük bilye ağırlığı ve numune eğimi ile oluştuğundan genellikle oldukça düşük değerdedir (yaklaşık 0,4 N) (Gee vd., 2002).

Aşındırıcı partiküller, bilye ile numune arasında serbestçe hareket eder, yuvarlanır, kayar ve numune yüzeyini mikroskobik ölçekte çizer veya kazır. Bu, "üç cisimli aşınma" (three-body abrasion) olarak bilinir, çünkü aşınma sisteminde

numune (birinci cisim), bilye (ikinci cisim) ve aşındırıcı partiküller (üçüncü cisim) etkileşim halindedir. Bu yöntem, özellikle ince filmlerin ve kaplamaların aşınma mekanizmalarını (örn. mikrokasma, mikropulluklama, mikroyorulma) anlamak için değerli bilgiler sunar (Carneiro da Silva vd., 2022).

2.2.2 Sabit top (Fixed-ball) yöntemi

Sabit top yönteminde test düzeneği bir elektrik motoru, elektrik motorundan hareket alan bir mil, milin tahrik ettiği küresel bilye, yük uygulanabilen bir pivot mekanizmasına sahip deney numunesi tutucudan ibarettir. Serbest top yönteminde olduğu gibi bu yöntemde de aşındırıcılı suyu bilye üzerine damlatan bir şırınga sistemi bulunmaktadır. Bu yöntem, genellikle çok sert malzemelerin ve kaplamaların (örn. elmas benzeri karbon (DLC) kaplamalar, seramikler) aşınma davranışını incelemek için kullanılır (Martins vd., 2021).

2.3 Aşınma hacmi hesabı

Mikroabrazyon testinin temel çıktılarından biri, numuneden uzaklaştırılan aşınma hacminin (V) belirlenmesidir. Archard kuralına göre oluşan hacim kaybı Eşitlik 1 ile hesaplanır (Archard, 1953).

$$V = K.S.N \quad (1)$$

burada V aşınma hacmi, S kayma mesafesi (topun çevresi ile devir sayısının çarpımı) ve N ise uygulanan yüküdür.

Aşınmanın sadece kaplama ile sınırlı olduğu ve altlık malzemeye geçmediği durumda hacim kaybı (V_c) oluşan iz geometrisinden Eşitlik 2 ile hesaplanabilir.

$$V_c = \frac{\pi.b^4}{64.R} \quad (2)$$

burada b izin çapı, R ise topun yarıçapıdır ($b \ll R$).

Aşınma kaplama kalınlığı aşarak altlık (substrate) malzemeye de geçmiş ise hacim kaybı Eşitlik 3 te verildiği gibi kaplama ve altlık için ayrı yarı belirlenebilir.

$$V_c = \frac{\pi.(b^4 - a^4)}{64.R}, \quad V_s = \frac{\pi.a^4}{64.R} \quad (3)$$

burada a altlık üzerinde oluşan iz çapıdır.

Bu durumda aşınma katsayısı kaplama (K_c) ve altlık (K_s) için Eşitlik 4'teki gibi yazılabilir.

$$K_c = \frac{V_c}{S.N}, \quad K_s = \frac{V_s}{S.N} \quad (4)$$

Diğer bir ifade ile kaplama+altlık aşınma durumu için genişletilmiş Archard kuralı Eşitlik 5'teki gibi yazılabilir (Rutherford vd., 1996).

$$S.N = \frac{V_c}{K_c} + \frac{V_s}{K_s} \quad (5)$$

Archard yasası, test parametrelerinin aşınma hacmi üzerindeki etkisini anlamak ve farklı malzemelerin aşınma dirençlerini karşılaştırmak için teorik bir temel sunmaktadır.

3. Genel Uygulama Alanları

Mikroabrazyon testi, başta ince film kaplamalar olmak üzere geniş bir malzeme yelpazesinin tribolojik karakterizasyonunda kendine önemli bir yer bulmuştur. Uygulama alanları şunları içerir:

***İnce Film ve Yüzey Kaplamaları:** Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) veya Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) yöntemleriyle üretilen TiN, AlTiN, CrN, WC/C, DLC (Elmas Benzeri Karbon) gibi sert kaplamaların aşınma direnci, aşınma mekanizmaları ve film/tabana malzeme ara yüzey yapışması incelenir (Silva vd., 2003; Silva vd., 2014). Bu, özellikle takım çelikleri, kesici takımlar ve kalıplar üzerindeki koruyucu kaplamaların performansını değerlendirmek için kritiktir (Figuerola vd., 2014).

***Seramikler ve Metal Matrisli Kompozitler:** Yüksek sertliğe sahip seramikler ve metal matrisli kompozitlerin mikroabrazyon dirençleri, bu test yöntemiyle etkin bir şekilde analiz edilebilir.

***Biyomedikal Uygulamalar:** Biyomedikal implantlarda kullanılan malzemelerin (örn. titanyum alaşımları, krom alaşımları, polietilen) yüzey özelliklerinin ve aşınma davranışlarının incelenmesi, implant ömrünü ve biyoyoumluluğu anlamak açısından önemlidir (Nikam vd., 2025).

***Yüzey Mühendisliği ve Malzeme Geliştirme:** Yeni malzemelerin ve yüzey işleme tekniklerinin (örn. lazerle yüzey sertleştirme, nitrasyon) tribolojik performansını karşılaştırmak ve optimize etmek için önemli bir araçtır.

***Aşınma Mekanizmalarının Belirlenmesi:** Oluşan kraterin morfolojisi ve yüzey analizi (örn. SEM, EDS), mikrokese, mikropulluklama, mikroyorulma veya pullanma gibi baskın aşınma mekanizmalarının belirlenmesine yardımcı olur. Bu durum, malzeme tasarımında ve hizmet ömrü tahmininde kritik bilgiler sağlar.

Sonuç olarak, mikroabrazyon testi, geniş bir malzeme yelpazesinde, özellikle ince filmler ve kaplamalar gibi hassas yüzeylerde aşınma direncini ve mekanizmalarını karakterize etmek için güvenilir, hassas ve çok yönlü bir yöntemdir. Düşük malzeme tüketimi, hızlı test süresi ve tekrarlanabilirlik gibi

avantajları sayesinde, hem akademik araştırmalarda hem de endüstriyel Ar-Ge süreçlerinde önemli bir araç haline gelmiştir.

4. Sert kaplamaların mikroabrazyon ile aşınmasına dair çalışmalar

Malzeme yüzeylerinin aşınma direncinin iyileştirilmesi, endüstriyel bileşenlerin ömrünü uzatmak ve performanslarını artırmak için kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, sert kaplamalar, yüksek sertlikleri, düşük sürtünme katsayıları ve kimyasal inertlikleri sayesinde tribolojik uygulamalarda geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Mikroabrazyon testi, malzemelerin yüzey bölgelerinin aşınma direncini değerlendirmek için kullanılan, düşük yükler ve ince aşındırıcı partiküllerle karakterize edilen bir tekniktir. Bu teknikle yapılan aşınma deneylerinden elde edilen sonuçlar kullanılan aşındırıcı malzeme ve test koşullarına bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik göstermiştir.

Genel olarak, bu testlerin sonuçları ve temel bulguları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

4.1. Aşınma Direnci Sıralaması ve Malzeme Karşılaştırmaları

- **En Yüksek Dirençli Kaplamalar:** Aşındırıcı olarak TiO₂ kullanıldığında, sert DLC (Elmas Benzeri Karbon) kaplamalar en iyi aşınma direncini göstermiştir; bunu PVD CrN ve TiN kaplamaları takip etmiştir (Van Acker vd., 2004).

- **Titanyum Bazlı Kaplamalar:** TiN ve TiAlN gibi PVD ve CVD ile üretilen kaplamalar yaygın olarak test edilmiştir (Çalışkan, 2014; Huang vd., 2009; Van Acker vd., 2004; Batista vd., 2002; Zlatareva vd., 2025).

- **Dupleks Kaplamalar:** Plazma nitrürleme içeren Dupleks (Ti,Al)N kaplamaları, tek katmanlı benzerlerine göre en iyi aşınma direncini göstermiştir. Bu iyileşme, nitrürlenmiş katmanın sağladığı gelişmiş yük taşıma desteğiyle ilişkilendirilmiştir (Batista vd., 2002).

- **Dereceli (FG) Kaplamalar:** İşlevsel olarak derecelendirilmiş (FG) TiN ince filmleri, homojen (HM) TiN filmlerine kıyasla %33,3 daha yüksek aşınma direnci sergilemiştir. Bu, çatlak çekirdeklenmesine karşı daha yüksek direnç ve substrata daha iyi yapışma ile açıklanmıştır (Silva vd., 2023).

TiO₂ aşındırıcısı ile test edilen CVD TiN kaplamaları, PVD TiN kaplamalarına göre dört kat daha az dirençli bulunmuştur (Van Acker vd., 2004). SiC aşındırıcısı kullanılarak yapılan testlerde ise, Duplex (Ti,Al)N kaplaması, kaplamasız alt tabakaya göre altı kat daha fazla aşınma direnci göstermiş ve en düşük aşınma katsayısına (K_c) sahip olmuştur (Batista vd., 2002).

• **Krom Bazlı Kaplamalar:** CrN, AlCrN ve CrN/CrCN/DLC çok katmanlı sistemler test edilmiştir (Van Acker vd., 2004; Silva vd., 2014).

◦ Cr-N kaplamaları, SiC aşındırıcısına karşı test edildiğinde en düşük aşınma direncini göstermiştir; bunun nedeni, Cr-N'in sertliğinin SiC parçacıklarının sertliğinden daha düşük olması ve kaplamanın yırtılmasına/soyulmasına yol açmasıdır (Batista vd., 2002).

AlCrN, CrN ve AlTiN arasında en iyi darbe ve aşınma direncini göstermiştir (Mo vd., 2013).

SiC aşındırıcısı ile test edilen Cr-N kaplamaları (hem tek katmanlı hem de dubleks), kaplamasız alt tabakadan daha yüksek aşınma katsayısına (K_c) sahip oldukları için aşınma direncini artırmada etkili olmamıştır. Bu durum, Cr-N'nin nispeten düşük sertliğinin SiC parçacıklarının nüfuz etmesine ve soyulmaya neden olmasına bağlanmıştır (Baptista vd., 2021).

• **Karbon Bazlı (DLC) Kaplamalar:** DLC kaplamalar, düşük sürtünme özellikleri ve aşınma dirençleri nedeniyle sıkça test edilmiştir (Van Acker vd., 2004).

◦ TiO₂ aşındırıcısına karşı yapılan testlerde, sert DLC kaplamalar en yüksek aşınma direncini göstermiştir.

◦ DLC kaplamalar genellikle çok düşük sürtünme katsayısı (≈ 0.2 ila 0.5) sergilemektedir.

• **Diğer Kaplamalar:** TiB₂ (Casais vd., 2022), B₄C (Casais vd., 2022), WC-bazlı sert alaşımlar (Kamdi vd., 2011; Stachowiak vd., 2010), CoCrMo kaplamalar (Rodríguez-Castro vd., 2015), CoNiCrAlY termal püskürtme kaplamaları (Karaoglanlı vd., 2014), Al-bazlı nanoyapılı kaplamalar (Lawal vd., 2017), TiAlCrSiN kaplamalar (Martinho vd., 2009), biyomedikal implantlar için Ti-Co-Cr (Godwin vd., 2021) ve NiP+PTFE gibi yumuşak düşük sürtünmeli kaplamalar da incelenmiştir (Van Acker vd., 2004).

• **Sertlik Korelasyonu:** Genel bir kural olarak, aşınma hızı ile kaplama sertliği arasında her zaman yakın bir korelasyon bulunmamıştır. Ancak, kimyasal bileşimi ve yapısı çok benzer olan DLC tipleri arasında bu korelasyon gözlemlenmiştir. TiN ve CrN gibi seramik sert kaplamaların aşındırıcı aşınma direnci, sertliklerinin aşındırıcı parçacıkların sertliğine oranıyla ilişkilidir; aşındırıcının yüzeyi çizme yeteneği, yüzey sertliği arttıkça azalmaktadır (Van Acker vd., 2004).

4.2. Kaplama Mimarisi ve Yapısının Etkisi

• **Dubleks ve Tek Katmanlı Kaplamalar:** Plazma nitrürleme içeren dubleks kaplamalar ((Ti,Al)N, TiN, Cr-N), genellikle tek katmanlı benzerlerine göre daha yüksek mikro-aşındırıcı aşınma direnci göstermiştir. Bu iyileşme, nitrürlenmiş katmanın sağladığı yük taşıma desteğine bağlanmıştır (Batista vd., 2002).

• **Fonksiyonel Dereceli Kaplamalar (FG):** FG TiN ince filmleri, homojen (HM) TiN ince filmlerine kıyasla %33,3 daha yüksek aşınma direnci göstermiştir. Bu sonuç, çatlak çekirdeklenmesine ve yayılmasına karşı daha yüksek direnç ve alt tabakaya daha iyi yapışma ile açıklanmıştır (Carneiro da Silva vd., 2022; Silva vd., 2013).

4.3. Kritik Deney Parametreleri ve Aşınma Mekanizmaları

Mikroabrazyon test sonuçlarını etkileyen bir dizi parametre mevcuttur; bunlar arasında aşındırıcı malzeme, parçacık boyutu, yük, hız ve bilye yüzey koşulu bulunmaktadır (Gee vd., 2000; Gee vd., 2002; Gee vd., 2003).

Aşındırıcı Malzeme ve Boyutu:

Aşındırıcının sertliği ve boyutu, aşınma hızını doğrudan etkiler. SiC (silisyum karbür) gibi daha sert ve köşeli parçacıklar daha şiddetli aşınmaya neden olurken, TiO₂ (rutil) gibi daha yumuşak ve yuvarlak parçacıklar hafif aşındırıcı aşınma sağlar. SiC kullanıldığında, aşınma mekanizması kaplamaya göre değişmiştir. Sert TiN ve CrN kaplamaları, daha yumuşak olan bilyeye gömülen parçacıklar nedeniyle oluk açma yoluyla aşınmıştır. Buna karşın, SiC ile test edilen sert krom tabakasındaki aşınma, yuvarlanma tipi üç cisimli aşınmaya dönüşmüştür (Baptista vd., 2023). TiO₂ aşındırıcı kullanımında aşınma mekanizması sabit olarak yuvarlanma aşınması şeklinde gerçekleşmiştir (Van Acker vd., 2004).

İnce kaplamaların test edilmesi için genellikle 5 μ m'den daha küçük ince aşındırıcılar önerilir, çünkü 10–20 μ m'den büyük parçacıkların temas bölgesine girmesi sınırlıdır (Gee vd., 2002; Gee vd., 2003; Stachowiak vd., 2006). TiAlSiN kaplamalar üzerinde yapılan testlerde, daha büyük SiC parçacıkları (F800) genellikle üç cisimli yuvarlanma aşınmasına yol açarken; daha küçük SiC parçacıkları (F1000 ve F1200) iki cisimli oluk açma aşınmasını teşvik etmiştir. Genel olarak, daha büyük parçacık boyutunun TiAlSiN üzerinde daha fazla malzeme hacmi kaybına neden olduğu görülmüştür, ancak bu ilişki doğrusal değildir (Andrade vd., 2009).

Aşındırıcı Konsantrasyonu ve Yükün Etkisi:

Konsantrasyon: Aşındırıcı bulamaç konsantrasyonunun artırılması genellikle yuvarlanma aşınmasını destekler; bu durum, daha yüksek aşınma hacmi ve daha

düşük sürtünme katsayısı (μ) ile ilişkilendirilmiştir (Cozza, 2019). Ancak, yüzeyi dokulu (pürüzlü) bilyeler kullanılarak Al_2O_3 ile yapılan testlerde, konsantrasyon arttıkça bilye yüzeyine daha fazla partikül yerleştiği için oluk açma aşınması baskın hale gelmiştir (Pinto vd., 2021; Pinto vd., 2023).

◦ *Düşük Konsantrasyon:* Düşük aşındırıcı konsantrasyonu oluk açma aşınmasını desteklemiş, bu da daha düşük aşınma hacmi ve daha yüksek sürtünme katsayısı ile sonuçlanmıştır (Cozza, 2019).

Aşırı yüksek yüklerde, Hertzian temas basınçları teması o kadar yoğunlaştırır ki, aşındırıcı parçacıkların temas merkezine girmesi engellenir. Bu durum "ridging" (oluklanma/sırt oluşumu) olarak adlandırılır ve kraterin merkezinde aşınmanın azalmasına yol açar. Bu kritik değerin altındaki yüklerin kullanılması önerilmiştir (Gee vd., 2000; Gee vd., 2003).

Aşınma Mekanizmaları

Mikroabrazyon testinde, aşındırıcı partiküllerin hareket şekline bağlı olarak iki temel aşınma mekanizması belirlenmiştir: iki cisimli oluk açma (grooving) ve üç cisimli yuvarlanma (rolling)(Adachi vd., 2003).

▪ **Oluk Açma (Grooving) / İki Cisimli Aşınma:** Aşındırıcı parçacıkların, bilye yüzeyine gömülerek veya sabitlenerek numune üzerinde paralel oluklar açmasıyla oluşur. Bu mekanizma, genellikle yüksek sürtünme katsayısı (μ) ve nispeten düşük aşınma hacmi ile ilişkilidir (Cozza, 2019).

▪ **Yuvarlanma (Rolling) / Üç Cisimli Aşınma:** Aşındırıcı parçacıkların bilye ile numune arasında serbestçe yuvarlanması ve yüzeyde çoklu girintiler bırakmasıyla karakterizedir. Bu mekanizma, genellikle daha düşük sürtünme katsayısı ve daha yüksek aşınma hacmi ile sonuçlanmaktadır (Bose vd., 2005; Cozza, 2019).

Aşınma modları, uygulanan yüke ve aşındırıcı bulamaç konsantrasyonuna bağlıdır: Yükün artırılması yuvarlanmadan oluk açmaya geçişi desteklerken, aşındırıcı konsantrasyonunun artırılması oluk açmadan yuvarlanmaya geçişi destekler (Gee vd., 2002).

Bilye Yüzey Durumu ve Sertliğinin Etkisi

Bilyenin yüzey durumu, parçacıkların temasa sürüklenmesini kolaylaştırdığı için kritik öneme sahiptir. Yeni, pürüzsüz bilyeler yerine önceden koşullandırılmış veya pürüzlendirilmiş bilyeler kullanıldığında daha tekrarlanabilir sonuçlar elde edilmektedir (Ardila vd., 2020; Baptista vd., 2021).

◦ Yumuşak bilye malzemeleri, aşındırıcı parçacıkların bilyeye gömülmesini teşvik ederek oluk açma aşınmasını artırır (Ardila vd., 2021).

◦ Polimerik bilyeler (PTFE) çok düşük sürtünme ve düşük aşınma direnci gösterir, bu da onların bu test tipi için uygun olmadığını gösterir. AISI 304 gibi daha yumuşak çelik bilyeler, AISI 52100'e göre daha fazla parçacık sürükleyerek daha büyük kraterler oluşturur (Pinto vd., 2021).

4.4. Ölçüm Yöntemi Etkisi

Optik mikroskopisi ile yapılan ölçümler, özellikle oluk açma aşınması baskın olduğunda ve krater kenarları yuvarlaklaştığında, krater hacimlerinin olduğundan fazla bir değerde ölçülmesine neden olmuştur. Profilometre kullanımı genellikle daha güvenilir sonuçlar vermiştir (Schiffmann vd., 2005). Kalın kaplamalar ($>10\mu m$) için non-perforating testler daha kullanışlıdır, zira uzun süre delinme olmaz. Çok ince kaplamalar ($<1\mu m$) için ise perforasyon testleri tek seçenektir.

Bu sonuçlar, mikroabrazyon testinin, özellikle ince filmler için aşınma davranışını incelemek üzere tasarlanmış çok yönlü bir araç olduğunu, ancak elde edilen aşınma mekanizmasının ve katsayılarının test edilen malzemelerin ve test parametrelerinin karmaşık etkileşimine son derece duyarlı olduğunu göstermektedir.

5. Sonuç

Mikroabrazyon testi, ince ve sert kaplamaların aşınma direncini sistematik olarak değerlendirmek için çok yönlü ve ekonomik bir yöntemdir. Parametrelerin (aşındırıcı tipi, yük, bilye durumu) titizlikle kontrol edilmesi, tekrarlanabilir aşınma katsayısı değerlerinin elde edilmesini sağlar. Mikroabrazyon test yöntemi, kaplama mimarisinin (dupleks/dereceli) ve malzemenin (DLC, TiAlN vs.) aşınma performansına etkilerini net bir şekilde ortaya koyarak, tribolojik uygulamalar için doğru kaplama seçimini destekleyen kritik bilgiler sunmaktadır. Aşınma mekanizmalarının (oluk açma/yuvarlanma) kontrolü ve doğru ölçüm tekniklerinin seçimi, bu testin güvenilirliğini ve endüstriyel alaka düzeyini artırmaktadır.

Kaynakça

- Adachi, K., & Hutchings, I.M. (2003). Wear-mode mapping for the micro-scale abrasion test. *Wear*, 255, 23–29.
- Andrade, M.F.C., Martinho, R.P., Silva, F.J.G., Alexandre, R.J.D., & Baptista, A.P.M. (2009). Influence of the abrasive particles size in the micro-abrasion wear tests of TiAlSiN thin coatings. *Wear*, 267(1–2), 12–18.
- Archard, J.F. (1953). Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics*, 24(8), 981–988.
- Ardila, M.A.N., Costa, H.L., & de Mello, J.D.B. (2020). Influence of the ball material on friction and wear in microabrasion tests. *Wear*, 450–451, 203266.
- Ardila, M.A.N., Costa, H.L., & de Mello, J.D.B. (2021). Topographic evolution of balls used in microabrasion tests. *Wear*, 476, 203582.
- Baptista, A., Pinto, G.F., Sousa, V.F.C., Silva, F.J.G., & Fernandes, F. (2023). Study on the Micro-Abrasion Wear Behavior of PVD Hard Coating under Different SiC Abrasive Particles/Distilled Water Ratios. *Materials*, 16(8), 2939.
- Baptista, A., Pinto, G., Silva, F.J.G., Ferreira, A.A., Pinto, A.G., & Sousa, V.F.C. (2021). Wear Characterization of Chromium PVD Coatings on Polymeric Substrate for Automotive Optical Components. *Coatings*, 11(5), 555.
- Batista, J.C.A., Godoy, C., & Matthews, A. (2002). Micro-scale abrasive wear testing of duplex and non-duplex (single-layered) PVD (Ti,Al)N, TiN and Cr–N coatings. *Tribology International*, 35(6), 363–372.
- Bose, K., & Wood, R.J.K. (2005). Optimum tests conditions for attaining uniform rolling abrasion in ball cratering tests on hard coatings. *Wear*, 258(3–4), 322–332.
- Carneiro da Silva, F., de Matos Macedo, M., Costa Miscione, J.M., Fontana, L.C., Sagás, J.C., Cozza, R.C., & Schön, C.G. (2022). Use of ball-cratering wear test and nanoscratching test to compare the wear resistance of homogeneous and functionally graded titanium nitride thin films. *Journal of Materials Research and Technology*, 16, 1230–1240.
- Casais, R., Baptista, A.M., Silva, F.J., Andrade, F., Sousa, V., & Marques, M.J. (2022). Experimental study on the wear behavior of B4C and TiB2 monolayered PVD coatings under high contact loads. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120(11–12), 6585–6604.
- Cozza, R.C. (2019). Thin Films: Study of the Influence of the Micro-Abrasive Wear Modes on the Volume of Wear and Coefficient of Friction. IntechOpen.
- Çalışkan, H. (2014). Effect of test parameters on the micro-abrasion behavior of PVD CrN coatings. *Measurement*, 55, 444–451.

- Figueroa, M., García, E., Muhl, S., & Rodil, S. (2014). Preliminary Tribological Study and Tool Life of Four Commercial Drills. *Tribology Transactions*, 57(4), 581–588.
- Gee, M.G., & Wicks, M.J. (2000). Ball crater testing for the measurement of the unlubricated sliding wear of wear-resistant coatings. *Surface and Coatings Technology*, 133–134, 376–382.
- Gee, M.G., Gant, A., Hutchings, I., Bethke, R., Schiffman, K., Van Acker, K., Poulat, S., Gachon, Y., & von Stebut, J. (2003). Progress towards standardisation of ball cratering. *Wear*, 255(1–6), 1–13.
- Gee, M.G., Gant, A., Hutchings, I., Bethmann, K., Schiffmann, K., Van Acker, K., Poulat, S., Gachon, Y., & von Stebut, J. (2002). *Ball Cratering or Micro-Abrasion Wear Testing of Coatings* (Measurement Good Practice Guide No 57). National Physical Laboratory.
- Godwin, G., Julyes Jaisingh, S., Shunmuga Priyan, M., & Christopher Ezhil Singh, S. (2021). Wear and corrosion behaviour of Ti-based coating on biomedical implants. *Surface Engineering*, 37(1), 32–41.
- Huang, W., Wang, G., & Li, Z. (2009). Research on Micro-Abrasion Performances of TiN Coating in Simulated Body Fluid. In *Technical Sessions—Proceedings of CIST2008 & ITS-IFTOMM2008 Beijing, China*.
- Kamdi, Z., Shipway, P.H., Voisey, K.T., & Sturgeon, A.J. (2011). Abrasive wear behaviour of conventional and large-particle tungsten carbide-based cermet coatings as a function of abrasive size and type. *Wear*, 271(9–10), 1264–1272.
- Karaoglanli, A.C., Caliskan, H., Gok, M.S., Erdogan, A., & Turk, A. (2014). A Comparative Study of the Microabrasion Wear Behavior of CoNiCrAlY Coatings Fabricated by APS, HVOF, and CGDS Techniques. *Tribology Transactions*, 57(1), 11–17.
- Lawal, J., Kiryukhantsev-Korneev, P., Matthews, A., & Leyland, A. (2017). Mechanical properties and abrasive wear behaviour of Al-based PVD amorphous/nanostructured coatings. *Surface & Coatings Technology*, 310, 59–69.
- Leroy, C., Schiffmann, K.I., Van Acker, K., & von Stebut, J. (2005). Ball cratering an efficient tool for 3 body microabrasion of coated systems. *Surface & Coatings Technology*, 200(1–4), 153–156.
- Martinho, R.P., Andrade, M.F.C., Silva, F.J.G., Alexandre, R.J.D., & Baptista, A.P.M. (2009). Micro-abrasion wear behaviour of TiAlCrSiN nanostructured coatings. *Wear*, 267(5–8), 1160–1165.
- Martins, P.S., Gonçalves Carneiro, J.R., Bab, E.C.T., Vieira, V.F., Amaral, D.B., & da Cruz, N.C. (2021). Study on the Tribological Behavior of Wear and

Friction Coefficient on AISI M35 High-Speed Steel with and without DLC Coating. *Materials Research*, 24(2), e20200577.

- Mo, J.L., Zhu, M.H., Leyland, A., & Matthews, A. (2013). Impact wear and abrasion resistance of CrN, AlCrN and AlTiN PVD coatings. *Surface & Coatings Technology*, 215, 170–177.
- Nikam, N., Shenoy B.S., Chethan K N, Keni, L.G., Shetty, S., & Bhat N.S. (2025). Advancements in Surface Coatings for Enhancing Longevity in Hip Implants: A Review. *Prosthesis*, 7(1), 21.
- Pinto, G.F., Baptista, A., Sousa, V.F.C., Silva, F.J.G., Evaristo, M., & Fernandes, F. (2023). Study on the Wear Modes of PVD Films Using Different Concentrations of Al₂O₃ Abrasive Particles and Textured Rotating Balls. *Coatings*, 13(3), 628.
- Pinto, G., Baptista, A., Silva, F., Porteiro, J., Míguez, J., & Alexandre, R. (2021). Study on the Influence of the Ball Material on Abrasive Particles' Dynamics in Ball-Cratering Thin Coatings Wear Tests. *Materials*, 14(3), 668.
- Rodríguez-Castro, G.A., Reséndiz-Calderon, C.D., Jiménez-Tinoco, L.F., Meneses-Amador, A., Gallardo-Hernández, E.A., & Campos-Silva, I.E. (2015). Micro-abrasive wear resistance of CoB/Co₂B coatings formed in CoCrMo alloy. *Surface & Coatings Technology*, 284, 258–263.
- Rutherford, K.L., Hutchings, I.M. (1996). A micro-abrasive wear test, with particular application to coated systems, *Surf. Coat. Technol.* 79, 231–239.
- Schiffmann, K. I., Bethke, R., & Kristen, N. (2005). Analysis of perforating and non-perforating micro-scale abrasion tests on coated substrates. *Surface & Coatings Technology*, 200(7), 2348–2357.
- Silva, F J.G., Fernandes, A. J. S., Costa, F. M., Teixeira, V., Baptista, A. P. M., & Pereira, E. (2003). Tribological behaviour of CVD diamond films on steel substrates. *Wear*, 255(1–2), 846–853.
- Silva, F.J.G., Martinho, R.P., & Baptista, A.P.M. (2014). Characterization of laboratory and industrial CrN/CrCN/diamond-like carbon coatings. *Thin Solid Films*, 550, 278–284.
- Silva, W.M., Suarez, M.P., Machado, A.R., & Costa, H. L. (2013). Effect of laser surface modification on the micro-abrasive wear resistance of coated cemented carbide tools. *Wear*, 302(1–2), 1230–1240.
- Stachowiak, G.B., Stachowiak, G.W., & Brandt, J.M. (2006). Ball-cratering abrasion tests with large abrasive particles. *Tribology International*, 39(1), 1–11.
- Stachowiak, G.B., Stachowiak, G.W., & Brandt, J.M. (2010). Tribological characteristics of WC-based claddings using a ball-cratering method. *Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 28(1), 95–105.

- Van Acker, K., & Vercammen, K. (2004). Abrasive wear by TiO₂ particles on hard and on low friction coatings. *Wear*, 256(3–4), 353–361.
- Zlatareva, E., Chitanov, V., Kolaklieva, L., Kolchev, S., Cholakova, T., Pashinski, C., Hribar, T., Čekada, M., & Kakanakov, R. (2025). Development and Research of a Ti/TiN/TiAlN Hard Coating. *Journal of Physics: Conference Series*, 2952, 012007.

BÖLÜM 25

Enerji Depolama Yöntemleri

Muhammet Özdoğan¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye, ORCID: 0000-0002-3523-6035

Giriş

İnsanlık, varoluşundan beri gıda, enerji ve barınma olmak üzere üç temel gereksinime ihtiyaç duymuştur. Tarihsel süreç incelendiğinde, bu gereksinimler içinde en büyük değişimin enerjiye duyulan ihtiyaçta gerçekleştiği görülmektedir. Başlangıçta yalnızca ısınma amacıyla kullanılan enerji, buhar makinesinin geliştirilmesi ve elektriğin keşfiyle birlikte çok daha geniş bir kullanım alanına yayılmıştır. Nüfus artışı, sanayileşme ve teknolojik ilerlemeler, enerji kaynaklarına olan talebi ve bağımlılığı önemli ölçüde artırmıştır. Bunun yanı sıra gıda üretimindeki modernleşme ve barınma koşullarındaki dönüşüm de enerji ihtiyacını etkileyen önemli etmenler arasında yer almıştır.

1980 yılında 78012 TWh olan küresel enerji tüketimi, 2024 yılı itibarıyla 164444 TWh seviyesine yükselmiş olup, fosil yakıtların toplam enerji arzındaki payı %81,5 düzeyinde kalmıştır (Energy Institute, Statistical Review of World Energy 2024). Fosil kaynakların tükenebilir yapısı ve çevre üzerinde yarattığı olumsuz etkiler dikkate alındığında, yenilenebilir enerji kullanımının artırılması ve mevcut enerji kaynaklarının daha verimli değerlendirilmesi zorunlu hâle gelmiştir.

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında hidroelektrik, jeotermal, güneş, rüzgâr ve nükleer enerji önemli bir yer tutmaktadır. Ancak güneş ve rüzgâr enerjisinin iklim koşullarına bağlı olması, bu kaynaklardan sürekli elektrik üretimini güçleştirmektedir. Nükleer, hidrolik ve jeotermal enerji ise mobil üretim imkânı sunmadığı için kullanım alanı sınırlıdır. Türkiye, Almanya ve Çin gibi enerji ihtiyacının büyük kısmını ithalat yoluyla karşılayan ülkelerde yenilenebilir enerji kullanım oranının artırılması ve enerjinin depolanması stratejik bir gereklilik hâline gelmiştir. Bunun nedeni, fosil kaynak arz eden ülkelerin zaman zaman enerji kaynaklarını siyasi bir baskı unsuru olarak kullanabilmesidir. Yenilenebilir enerji üretiminin yaygınlaştırılması ve depolama teknolojilerinin geliştirilmesi sayesinde bu bağımlılık azaltılabilmekte ve enerji arz güvenliği güçlendirilebilmektedir.

Günümüzde ülkelerin karşı karşıya olduğu en önemli sorunlardan biri, ucuz, temiz, kolay erişilebilir ve sürekliliği olan enerji kaynakları oluşturabilmektir. Bu doğrultuda çeşitli enerji depolama yöntemleri geliştirilmiştir. Türkiye’de Tuz Gölü altında yürütülen doğal gaz depolama projesi, bu çalışmalara örnek teşkil etmektedir. Enerji depolama; yalnızca ucuz ve temiz enerji kullanımına olanak sağlaması açısından değil, aynı zamanda enerji arzının sürekliliğini güvence altına alması bakımından da kritik bir öneme sahiptir. Enerji depolamanın başlıca önemleri aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Enerji temininde süreklilik sağlar.

- Arz-talep dengesizliğini azaltır veya ortadan kaldırır.
- Ucuz enerji teminine katkı sunar.
- Enerji sistemlerinin kapasite gereksinimlerini düşürür.
- Enerji kayıplarını ve israfını önler.

İhtiyaçların, enerji kaynaklarının, kullanım alanlarının ve sistem kapasitelerinin farklılık göstermesi, insanlığı çeşitli enerji depolama yöntemleri geliştirmeye yöneltmiştir. Enerji depolama sistemlerinin tasarımındaki temel amaç; enerjinin istenilen yerde ve zamanda, ihtiyaç duyulan miktarda, yüksek kullanılabilirlik ve verimlilikle sağlanabilmesidir. Literatürde yaygın olarak kullanılan enerji depolama yöntemleri aşağıdaki şekilde sınıflandırılmaktadır:

- ❖ Mekanik enerji depolama
- ❖ Kimyasal enerji depolama
- ❖ Elektrik enerjisi depolama
- ❖ Isı enerjisi depolama
- ❖ Nükleer enerji depolama
- ❖ Yerçekimi enerjisi depolama

Mekanik Enerji Depolama

Mekanik enerji, bir sistemde depolanan potansiyel ve kinetik enerjilerin toplamı olarak tanımlanmaktadır. Enerji mekanik formda depolanırken, sistemin potansiyel veya kinetik enerji bileşenleri artırılarak depolama gerçekleştirilir. Potansiyel enerji; bir cismin yüksekliğinin artırılması veya bir elastik elemanın (örneğin bir yay) sıkıştırılmasıyla depolanabilirken, kinetik enerji bir kütlenin açışal ya da doğrusal hızının artırılmasıyla depolanır.

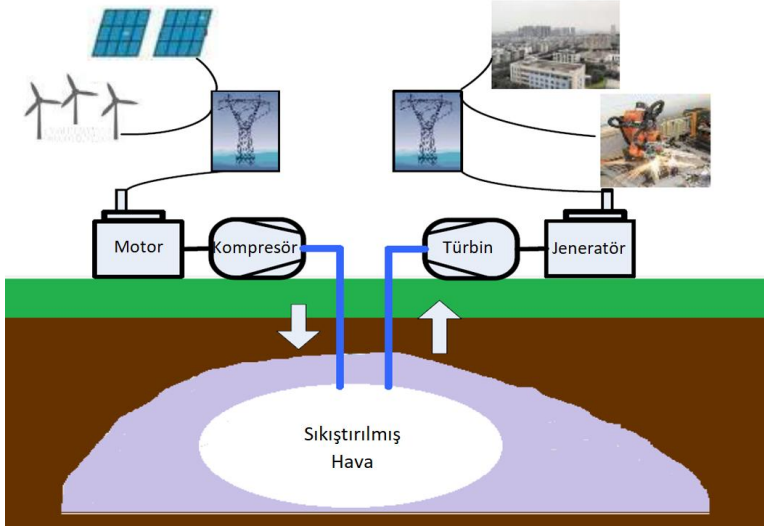
Depolanan mekanik enerji, türbinlerde olduğu gibi başka enerji türlerine dönüştürülerek kullanılabilmesi gibi, asansör karşı ağırlığı örneğinde olduğu gibi doğrudan mekanik iş üretimi için de kullanılabilir. Mekanik enerji pratikte farklı yöntemlerle depolanabilmekle birlikte, günümüzde yaygın olarak kullanılan başlıca yöntemler şunlardır:

1. Yüksek koda su pompalayarak enerji depolama (PHS)
2. Havayı sıkıştırarak enerji depolama (CAES)
3. Volanlar kullanılarak enerji depolama (flywheel)
4. Yerçekimi enerji depolama

Yüksek Koda Su Pompalayarak Enerji Depolama

Bu yöntemde, ihtiyaç fazlası elektrik enerjisi pompalar aracılığıyla suya aktarılır ve suyun daha yüksek kotta bulunan üst rezervuara taşınması sağlanır. Böylece elektrik enerjisi, üst rezervuardaki suyun potansiyel enerjisine

kurulum maliyetlerini artırmıştır. Günümüzde yüksek basınçta dayanıklı çelik boruların yüzeye yakın bölgelerde kullanılmasıyla bu maliyetler önemli ölçüde azaltılmıştır. Hava genellikle 40–70 bar basınç seviyelerine kadar sıkıştırılmaktadır. Sıkıştırılmış hava depolama sistemlerinin enerji yoğunluğu yaklaşık 12 kWh/m^3 , sistem verimi ise %70 seviyesindedir.



Şekil 2. Havanın sıkıştırılmasıyla enerji depolama yönteminin çalışma yapısı (Wang et al., 2024)

Volanlar Kullanılarak Enerji Depolama

Kinetik enerjinin döner bir kütlede depolanması oldukça eski bir yöntem olmakla birlikte, gelişen teknoloji sayesinde modern enerji depolama sistemlerinde önemli bir yer edinmiştir. Volanlar, değişken yüklerin bulunduğu sistemlerde fazla enerjiyi soğurarak sistemin dinamik davranışını stabilize eder ve mekanik zorlanmaların önüne geçer. Sistemde yükün yetersiz olduğu anlarda ise depolanan enerji geri besleme olarak kullanılır.

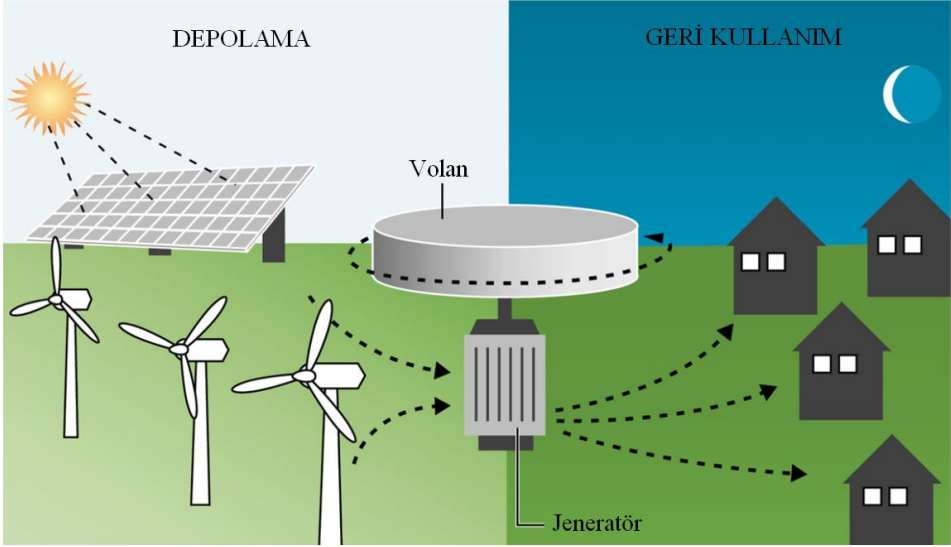
Volanlarda enerji, döner kütlenin açısal hızının artırılmasıyla depolanır. Volanın atalet momentinin artması depolanan enerji miktarını da artırır. İlk uygulamalarda enerji tamamen mekanik olarak depolanıp mekanik olarak geri kullanılırken (Mekanik → Mekanik → Mekanik), teknolojinin gelişmesiyle elektrik enerjisinin mekanik formda volanda depolanması ve tekrar elektrik enerjisine dönüştürülmesi mümkün hâle gelmiştir (Elektrik → Mekanik → Elektrik). Bu durum, volanların kullanım alanını önemli ölçüde genişletmiştir.

Şekil 3'te verilen sistemde, gündüz güneş panellerinin ürettiği fazla enerji motor aracılığıyla volkana aktarılır ve depolanır. Gece ise volandan jeneratör yardımıyla elektrik üretilerek enerji ihtiyacı karşılanır.

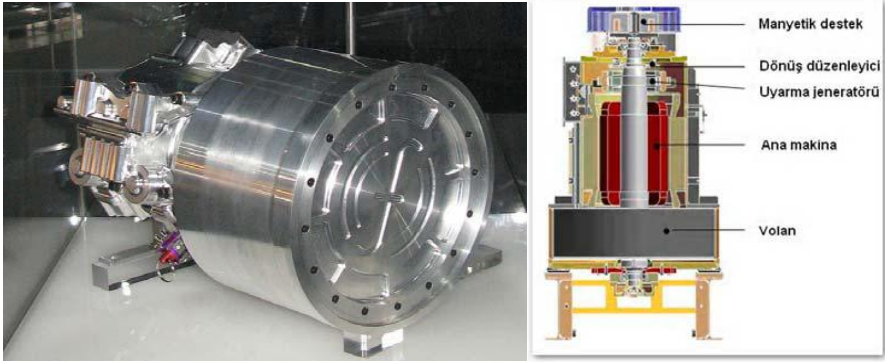
Düşük hızlı volanlar dakikada 6000 devire kadar çıkabilirken, Şekil 4'te gösterilen yüksek hızlı volanlar dakikada 50.000 devire ulaşabilmektedir. Devir sayısındaki artış, volanın enerji yoğunluğunu 5 Wh/kg seviyesinden 100 Wh/kg seviyelerine kadar yükseltmektedir. Volanlar çok hızlı şarj/deşarj olabildiğinden

tepki süreleri oldukça kısadır; bu durum frekans kararlılığı uygulamalarında büyük bir avantaj sağlar.

Bununla birlikte, hareketli parça içermeleri nedeniyle sürtünme ve hava direnci gibi kayıplar yüksektir ve bu nedenle uzun süreli enerji depolama için volanların kullanılması uygun değildir.



Şekil 3. Volan kullanılarak elektrik enerjisinin mekanik olarak depolanmasının çalışma yapısı (Tycorun, 2025)



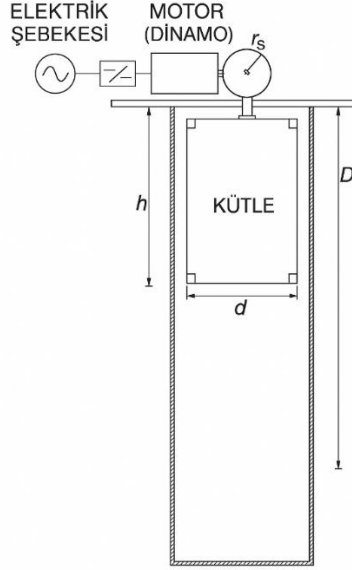
Şekil 4. Yüksek hızlı volan sistemi (Kozak, 2012)

Yerçekimi Enerjisi Depolama

Bu yöntem, yüksek koda su pompalayarak enerji depolamaya benzer şekilde çalışır; ancak su yerine büyük kütlelerin yükseltilip alçaltılması prensibine dayanır. Sistemde, derinliği 1500 metreyi bulabilen kuyuların içinde 5000 tona kadar ulaşan büyük kütleler halatlar yardımıyla aşağı-yukarı hareket ettirilir. Kütle aşağı doğru hareket ettiğinde halat mekanizması bir jeneratörü döndürerek elektrik üretir (Şekil 5).

Elektrik üretiminin yeterli olduğu zamanlarda ise şebekeden alınan enerji ile motor çalıştırılır ve kütle tekrar yukarı konuma taşınarak potansiyel enerji

depolanmış olur. Bu yöntem, su gerektirmemesi ve geniş arazi ihtiyacı bulunmaması nedeniyle alternatif bir yerçekimi temelli enerji depolama uygulaması olarak öne çıkmaktadır



Şekil 5. Yerçekimi enerji depolama sisteminin şematik gösterimi

Kimyasal Enerji Depolama

Kimyasal enerji, maddelerdeki kimyasal bağlarda depolanan ve kimyasal reaksiyonlar sonucunda açığa çıkan enerji olarak tanımlanır. Tersinir kimyasal reaksiyonlar kullanılarak enerji kimyasal bağlarda depolanabilir ve istenildiğinde geri kazanılabilir. Bu kapsamda elektrik ve ısı enerjisi uygun kimyasal süreçler aracılığıyla kimyasal enerjiye dönüştürülerek depolanabilmektedir.

Endotermik tepkimelerde ısı enerjisi soğurularak depolanırken, ekzotermik tepkimelerde depolanan enerji geri açığa çıkar. Elektrik enerjisi ise elektroliz benzeri yöntemlerle moleküllerin bileşenlerine ayrılması yoluyla kimyasal bağlarda tutulabilmektedir. Kimyasal reaksiyonların hızını artırmak amacıyla çoğu süreçte katalizörlerden yararlanılır.

Kimyasal enerji depolama alanında hidrojen ve amonyak, yüksek enerji yoğunluklarına sahip olmaları, uzun süre depolanabilmeleri ve geriye dönüştürülebilir süreçlere uygunlukları nedeniyle en yaygın kullanılan kimyasal taşıyıcılardır.

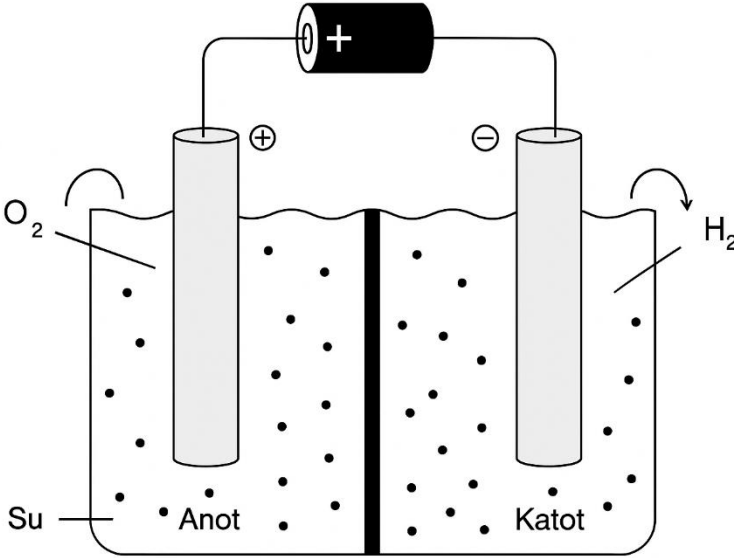
Hidrojen ile Kimyasal Enerji Depolama

Hidrojen doğal bir yakıt değildir ve doğada serbest halde bulunmaz. Su, doğalgaz ve kömür gibi bileşikler içerisinde bağlı hâlde bulunan hidrojen, çeşitli kimyasal süreçlerle ayrıştırılarak elde edilir. Hidrojen enerjisi; fosil yakıtlara

kıyasla çevreci oluşu, kaynak çeşitliliği ve sürdürülebilir üretilebilirliği nedeniyle önemli bir alternatif enerji taşıyıcısıdır.

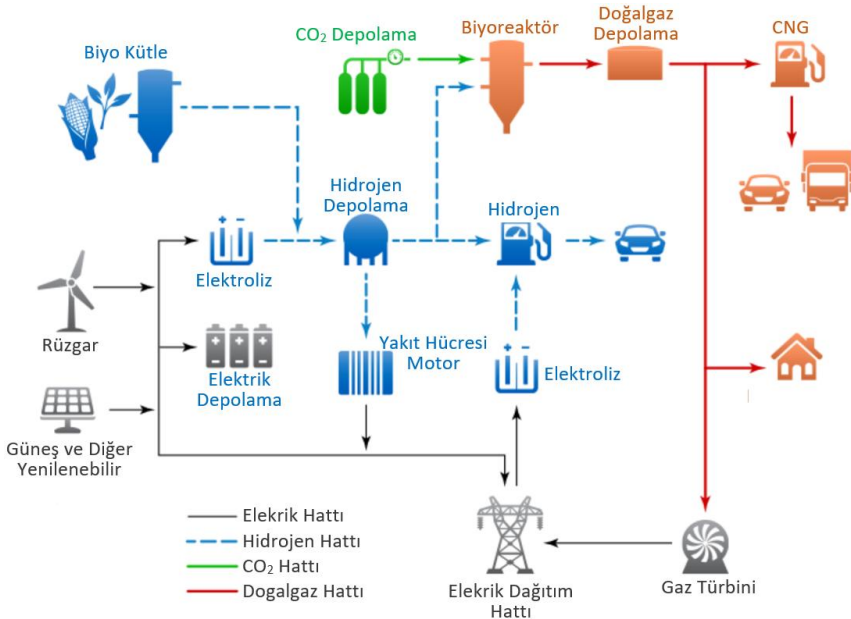
Hidrojen, enerji kaynağı olarak birçok alanda kullanılmaktadır. İçten yanmalı motorlar, yakıt pilleri, gaz türbinleri ve katalitik yakıcılar hidrojenin başlıca kullanım alanlarıdır. Hidrojenin yanması sonucunda karbon salınımı gerçekleşmemesi ve yalnızca su buharı oluşması, hidrojeni çevre dostu bir enerji taşıyıcısı hâline getirmektedir. Yakıt pillerinde hidrojenin kullanılmasıyla araçlarda, elektronik cihazlarda, konutlarda ve endüstriyel uygulamalarda temiz ve yüksek verimli enerji üretmek mümkündür.

Hidrojen üretimi için birçok yöntem bulunmaktadır. Güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarıyla üretilebildiği gibi, fosil yakıt reformasyonu, biyolojik süreçler ve suyun elektrolizi yoluyla da üretim gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 6'da elektroliz yöntemiyle hidrojen üretimi şematik olarak verilmiştir. Elektroliz sürecinde, suya doğru akım uygulanarak su moleküllü oksijen ve hidrojene ayrıştırılır. Bu süreçte anot ve katot elektrotları kullanılır.



Şekil 6. Elektroliz yöntemiyle hidrojen üretimi

Şekil 7'de hidrojen depolama ve geri kullanım süreci gösterilmiştir. Yenilenebilir veya fosil kaynaklardan elde edilen elektrik enerjisinin bir bölümü doğrudan şebekeye aktarılırken, fazla enerji elektroliz için kullanılarak kimyasal formda hidrojen üretimi sağlanır. Üretilen hidrojen, yakıt hücrelerinde elektrik üretmek, kimyasal süreçlerde kullanılmak veya yanıcı bir yakıt olarak değerlendirilmek üzere depolanmaktadır.



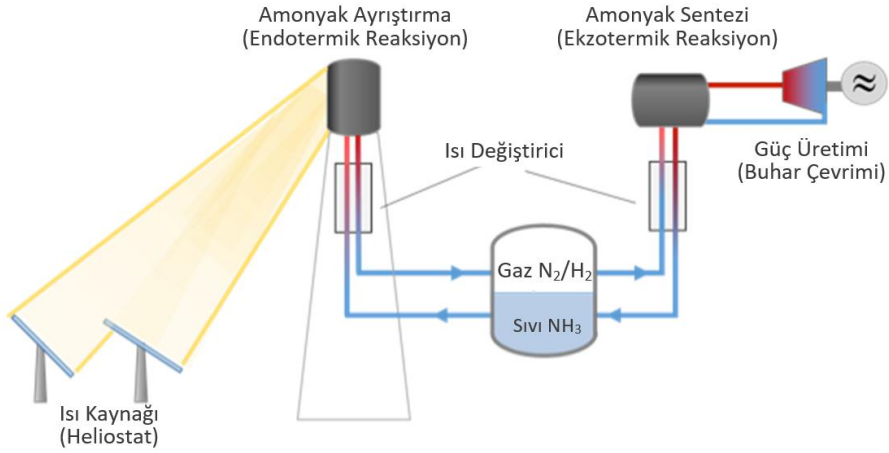
Şekil 7. Hidrojen depolama ve geri kullanımı sürecinin şematik gösterimi (Phap et al., 2022)

Amonyakla Kimyasal Enerji Depolama

Amonyak (NH_3), hem hidrojen taşıyıcısı olarak hem de doğrudan enerji depolamak amacıyla kullanılan önemli bir kimyasal maddedir. Amonyakın sentezlenmesi ve bileşenlerine ayrıştırılması sırasında gerçekleşen endotermik ve ekzotermik reaksiyonlarla birlikte enerji depolama ve geri kazanım süreçleri gerçekleşir.

Depolama aşamasında, kaynaktan alınan ısı enerjisi kullanılarak amonyakın bileşenleri olan azot (N_2) ve hidrojen (H_2) gazlarına ayrışması sağlanır. Bu süreç endotermik olduğundan ısı kimyasal bağlarda depolanmış olur. İhtiyaç hâlinde bu gazlar tekrar ekzotermik reaksiyona sokularak birleştirilir ve açığa çıkan ısı proseste kullanılabilir.

Şekil 8'de amonyak ile kimyasal enerji depolama yönteminin bir güneş enerjili güç santralinde uygulanışına ilişkin şematik gösterim verilmiştir. Bu tür sistemlerde amonyak, yüksek sıcaklık gerektiren proseslerde hem enerji depolama hem de enerji taşıyıcısı olarak önemli bir rol oynar.



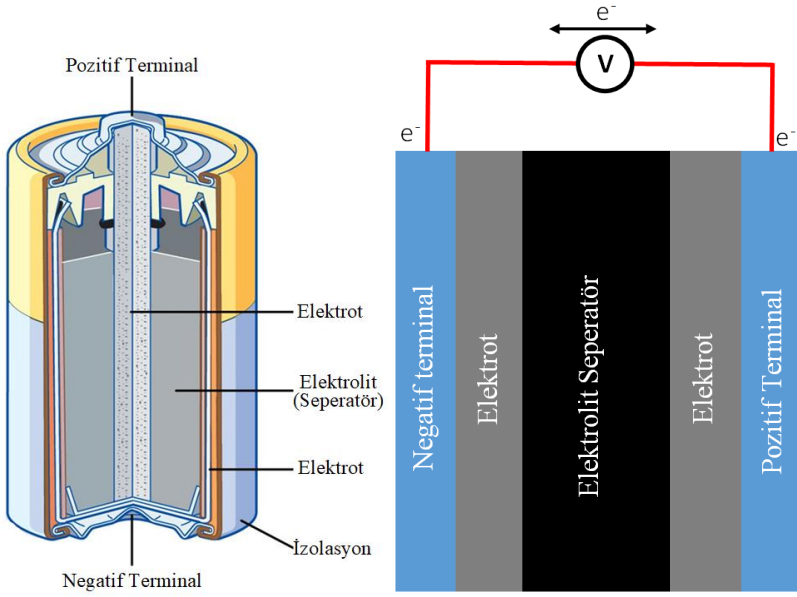
Şekil 8. Amonyakla enerji depolama (Abdiwe, 2016)

Elektrik Enerjisi Depolama

Elektrik enerjisinin modern yaşamda oynadığı rol, dijital teknolojilerin ve elektronik sistemlerin hızla gelişmesiyle birlikte daha da belirgin hâle gelmiştir. Gerek bireysel kullanımda gerekse sanayi ve ulaşım sektöründe elektrik enerjisine duyulan gereksinim arttıkça, bu enerjinin kesintisiz biçimde sağlanması temel bir zorunluluk hâline gelmiştir. Özellikle şarj edilebilir mobil cihazların, elektrikli iş makinelerinin ve elektrikli araçların yaygınlaşması, elektriğin depolanmasını sadece şebeke ölçeğinde değil, taşınabilir sistemler için de kaçınılmaz kılmaktadır. Bu ihtiyaç doğrultusunda günümüzde pek çok farklı elektrik depolama teknolojisi geliştirilmiş ve kullanılmaya başlanmıştır.

Bataryalar

Bataryalar, elektrik enerjisinin kimyasal yapıda tutulup ihtiyaç duyulduğunda yeniden elektrik enerjisine dönüştürüldüğü en eski ve en yaygın depolama yöntemlerinden biridir. Temel olarak, bataryalar pozitif (katot) ve negatif (anot) olmak üzere iki terminal içerir ve bu iki elektrot arasında iyon geçişine izin veren bir elektrolit ile elektriksel temasın önüne geçen bir ayırıcı tabaka bulunur (Şekil 9). Batarya bir dış devreye bağlandığında, negatif uçtan pozitif uca doğru elektron akışı gerçekleşir ve bu akış devre üzerinde elektriksel iş yapılmasını sağlar. Bataryaların türleri, yapılarını oluşturan elektrot malzemeleri ve kullanılan elektrolitin özelliklerine göre farklılık göstermektedir.



Şekil 9. Bataryaların genel yapısı

Kurşun-Asit Bataryalar

Kurşun-asit bataryalar üzerine ilk çalışmalar 1850’li yıllarda Carl Wilhelm Siemens ve Wilhelm Siesteden tarafından yapılmış, daha sonra 1859’da Gaston Planté bu bataryaların temelini oluşturan yeniden şarj edilebilir ilk modeli geliştirmiştir. Bu nedenle Planté, kurşun-asit bataryaların öncüsü olarak kabul edilmektedir.

Bu batarya tipinde, kurşun (Pb) anot görevini üstlenirken, kurşun dioksit (PbO_2) katot olarak kullanılmakta; sülfürik asit (H_2SO_4) ise elektrolit olarak görev yapmaktadır. Otomobillerde marş, aydınlatma ve ateşleme işlevlerinin yerine getirilmesinde uzun yıllardır yaygın şekilde kullanılmaktadır. Verimleri genellikle %72 ile %78 arasında değişmektedir.

Kurşun-asit bataryaların teknolojik olarak uzun süredir kullanılabilir oluşu, bazı avantajlar sağlamaktadır. Bunlar düşük maliyet, bakım kolaylığı ve şarj edilebilir bataryalar arasında nispeten düşük self-deşarj oranına sahip olmalarıdır. Ancak bu bataryalar yüksek sıcaklığa karşı hassas oldukları için performansları düşebilir, enerji yoğunlukları sınırlıdır ve çevrim ömürleri kısadır. Ayrıca içerdikleri kurşun ve asit bileşenleri çevre açısından risk taşımaktadır. Hücre başına yaklaşık 2 V gerilim üretmeleri nedeniyle yüksek voltaj gerektiren sistemlerde doğrudan kullanımları sınırlıdır.

Sodyum-Nikel Klorür Bataryalar

Sodyum-nikel klorür bataryalarıyla ilgili ilk çalışmalar 1978 yılında Güney Afrika’da başlatılmıştır. Yüksek enerji yoğunlukları sayesinde büyük boyutlu depolama yapılarında önemli avantaj sağlamaktadırlar. Bu bataryalar yaklaşık 270–350 °C aralığında çalışabilmekte olup elektrot malzemeleri sodyum ve nikel klorürden oluşmaktadır.

Sodyum-nikel klorür bataryalarının bir diğer önemli özelliği yüksek hücre gerilimi ve sık tekrar eden şarj-deşarj döngülerine karşı dayanıklılık göstermeleridir. Bu özelliklerinden dolayı elektrikli araçlar gibi mobil sistemlerde kullanılabilmeleri üzerine çalışmalar sürmektedir.

Nikel-Kadmiyum Bataryalar

Nikel-kadmiyum (Ni-Cd) bataryalar, elektrot olarak kadmiyum ve nikel oksit hidroksit içeren şarj edilebilir bataryalardır. Tek hücre gerilimleri yaklaşık 1,2 V düzeyindedir ve ortalama %75 verimle çalışmaktadırlar.

Kurşun-asit bataryalarla kıyaslandığında daha uzun çevrim ömrüne sahiptirler; bakım gereksinimleri düşük olup düşük sıcaklıklarda da etkili bir performans gösterebilirler. Bununla birlikte kadmiyumun zehirli bir metal olması, bu bataryaların çevresel zararlarının yüksek olmasına neden olur. Bu nedenle zamanla kullanımları büyük ölçüde azalmış ve yerlerini nikel-metal hibrit ve lityum-iyon bataryalara bırakmışlardır. 1990'lardan sonra çeşitli uygulamalarda ve medikal ekipmanlarda kullanımının kısıtlanması ya da tamamen yasaklanması bu zararlı etkilerin sonucudur.

Nikel-Metal Hidrit Bataryalar

Nikel-metal hidrit (NiMH) bataryalar, pozitif elektrotlarında nikel hidroksit, negatif elektrotlarında ise metal hidrit alaşımları kullanılan şarj edilebilir bataryalardır. Bünyelerinde ağır metaller bulundurmadıkları için kurşun-asit ve nikel-kadmiyum bataryalara kıyasla çevresel açıdan daha olumlu bir seçenek sunarlar. Enerji yoğunlukları Ni-Cd bataryalara göre %25–30 daha fazladır.

NiMH bataryalar lityum-iyon bataryalardan daha düşük enerji yoğunluğuna sahip olmalarına rağmen maliyet açısından avantaj sağlar. Ancak yüksek self-deşarj oranları ve uzun süreli depolama için uygun olmamaları, kullanım alanlarını sınırlamaktadır. Buna rağmen yenilenebilir enerji uygulamalarında ve hibrit araçlarda gelecek vadeden sistemler arasında yer almaktadır.

Sodyum-Sülfür Bataryalar

Sodyum-sülfür (NaS) bataryalar, temel olarak sıvı hâlde sodyum ve sülfür bileşenlerinden oluşan ve 300 °C civarında çalışan yüksek sıcaklıklı bataryalardır. Bu sıcaklıklarda sistem oldukça verimli bir çalışma sergiler ve teorik olarak verimlerinin %100'e yaklaşabildiği belirtilmektedir.

Ancak bu batarya teknolojisinin en belirgin dezavantajı, yüksek çalışma sıcaklığı gerektirmesi ve buna bağlı olarak yalıtım, güvenlik ve maliyet konularında ek zorluklar içermesidir. NaS bataryaların ticari olarak geliştirilmesi 30 yılı aşkın bir süreçtir; 2002 yılında Japon NGK firması tarafından ticarileştirilmiş ve hem Japonya'da hem de Kuzey Amerika'da kullanım alanı bulmuştur. Günümüzde daha güvenli ve ekonomik modeller geliştirmek amacıyla çalışmalar devam etmektedir.

Lityum İyon Bataryalar

Lityum-iyon bataryalar 1991 yılında Sony tarafından ticarileştirilmiş ve kısa süre içinde taşınabilir elektronik cihazların standart enerji depolama sistemi olmuştur. Şarj işlemi sırasında lityum iyonları pozitif elektrottan negatife,deşarj sırasında ise tam tersi yönde hareket eder.

Günümüzde cep telefonlarından dizüstü bilgisayarlara, elektrikli araçlardan yenilenebilir enerji depolama sistemlerine kadar pek çok alanda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Yüksek enerji yoğunluğu (yaklaşık 150 Wh/kg ve üzeri), yüksek hücre gerilimi (3,6–4,2 V arası) ve yüksek çevrim verimleri bu bataryaların tercih edilme nedenlerindendir.

Bununla birlikte aşırı şarj/deşarja duyarlılık, ısıl yönetim gereksinimi ve yüksek maliyet gibi dezavantajlar bulunmaktadır. Bu nedenle lityum-iyon teknolojisini daha güvenli ve ekonomik hâle getirmek için yeni elektrot ve elektrolit malzemeleri üzerine kapsamlı çalışmalar yapılmaktadır.

Akışkan Bataryalar

Akışkan (redoks akışkan) bataryalar, enerjinin dış tanklarda bulunan sıvı elektrolit çözeltilerinde depolandığı ve elektrokimyasal reaksiyonların bu elektrolitlerin hücreden geçirilmesiyle gerçekleştiği sistemlerdir. Hücrelerin sayısı sistemin sağlayabileceği gücü belirlerken, tanklardaki elektrolit hacmi depolanan toplam enerji miktarını tanımlar.

Bu bataryalar tipik olarak 1,8 V civarında hücre gerilimine sahiptir. Vanadyum redoks akışkan bataryalar, bu teknolojinin en yaygın örneklerinden biridir. Çözeltilerde farklı oksidasyon seviyelerindeki vanadyum iyonlarının membran üzerinden iyon değişimi yapmasıyla enerji dönüşümü sağlanır. Akışkan bataryaların en önemli avantajları arasında: Güç ve enerji kapasitelerinin birbirinden bağımsız ölçeklenebilmesi, Uzun çevrim ömrü, Derindeşarja uygunluk yer almaktadır. Buna karşın sistem karmaşıklığı ve yüksek maliyetler, yaygın kullanımın önündeki başlıca engellerdir. Bu nedenle maliyet azaltıcı yeni tasarımlar üzerine araştırmalar devam etmektedir.

Ultra Kapasitörler

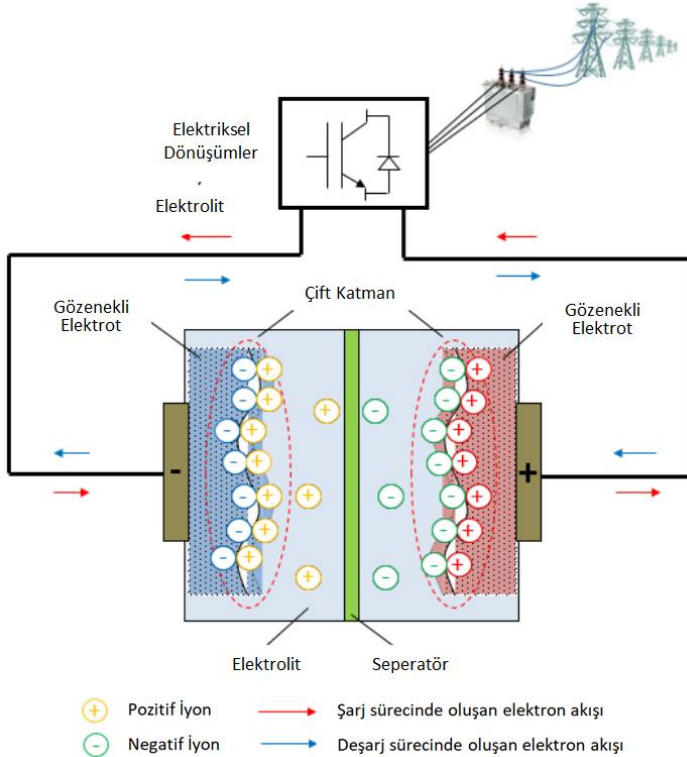
Elektrik enerjisinin depolanmasında kullanılan bir diğer yöntem ultra kapasitörlerdir (UK). Ultra kapasitörler, elektrik yükünü pozitif ve negatif yüzeylerde fiziksel olarak biriktiren sistemlerdir. UK teknolojisinin temelleri 1957 yılında Becker'in yaptığı çalışmalarla atılmış ve bu çalışma sonrasında patenti alınmıştır. Askerî amaçlı ilk kullanım ise 1982'de Pinnacle Araştırma Enstitüsü tarafından gerçekleştirilmiştir.

Ultra kapasitörler, çift katmanlı elektrokimyasal bir yapıya sahiptir. Yapı; yüksek yüzey alanına sahip elektrotlar, bu elektrotları birbirinden ayıran ve iyonların hareketine izin veren bir ayırıcı membran ile elektrolitten oluşur. Ayırıcı tabakanın görevi, elektrot yüzeylerinde oluşabilecek mekanik deformasyonları engellemek ve iyon geçişini düzenlemektir.

Bu sistemlerde yüksek kapasite değerine ulaşılmasının temel nedeni, elektrotların nano boyutlu gözenekli bir yapıya sahip olmasıdır. Ultra kapasitörler çoğunlukla küçük güç uygulamalarında tercih edilse de, elektrikli araçlar gibi daha büyük ölçekli sistemlerde kullanıldığında önemli faydalar sağlamaktadır. Özellikle rejeneratif frenleme gibi ani güç gerektiren durumlarda, UK'ların çok hızlı şarj olabilmesi büyük avantaj sağlar.

Bataryalar kimyasal reaksiyonlarla çalıştığı için şarj-deşarj döngü sayıları sınırlıyken, ultra kapasitörler fiziksel depolama yaptıkları için milyonlarca çevrim ömrüne sahiptir. Ayrıca düşük sıcaklıklardan (-40 °C) yüksek sıcaklıklara kadar geniş bir aralıkta performans kaybı olmadan çalışabilirler.

Ultra kapasitörlerin enerji yoğunluğunu artırmak amacıyla günümüzde çeşitli malzeme geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. Özellikle aktif karbon yerine karbon nanotüplerin kullanılması, depolanan enerji miktarında %25–50 arasında artış sağlayabilmektedir. Bu sayede çok daha küçük hacimlerde büyük elektriksel enerji depolanması mümkün hâle gelmektedir. Bir ultra kapasitörün yapısını gösteren örnek Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Ultra kapasitörün çalışma yapısının şematik gösterimi (Nikolaidis & Poullikkas, 2017)

Yakıt Pilleri

Yakıt pilleri, kimyasal enerji içeren yakıtların yanma gerektirmeden doğrudan elektrik enerjisine dönüştürüldüğü elektrokimyasal cihazlardır. Bu yönüyle, elektroliz reaksiyonunun tersinin kontrollü bir şekilde gerçekleştiği sistemler olarak düşünülebilir. Yakıt pilleri çalışırken doğru akım üretir ve yakıt ile oksitleyici sağlandığı sürece elektrik üretimi kesintisiz devam eder.

Hidrojen yakıt hücrelerinde en yaygın yakıttır; ancak metan, etanol, metanol ve doğal gaz gibi diğer yakıt türleri de uygun yakıt hücrelerinde kullanılabilir. Yakıt pillerinin en önemli üstünlüğü, mekanik bir çevrim gerektirmeden enerji üretmeleri nedeniyle yüksek verimle çalışabilmeleridir. Ayrıca sessiz çalışmaları, düşük sıcaklıklarda devreye alınabilme olanakları ve modüler yapıda olmaları yakıt pillerinin kullanım alanlarını genişletmektedir.

Yakıt pillerinin avantajları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Çok kısa sürede çalıştırılabilirler.
- Gürültüsüz ve titreşimsiz çalışma imkânı sunarlar.
- Doğrudan reaksiyonla enerji üretildiği için yüksek verimlidirler.
- Çevrim dışı yük değişimlerine hızlı tepki verirler.
- Uzaktan izlenip işletilebilirler.
- Ölçeklendirilmeleri kolaydır ve farklı boyutlarda üretilebilirler.
- Hidrojen, doğal gaz veya metanol gibi farklı yakıtlarla çalışabilirler.
- Yan ürün olarak açığa çıkan ısı geri kazanılabilir ve proseslerde kullanılabilir.
- Emisyon seviyeleri düşüktür ve çevreye zararları azdır.
- Mekanik bir aksam bulunmadığından uzun ömürlüdürler ve katı atık üretmezler.

Yakıt pillerinin dezavantajları ise aşağıdaki gibi listelenebilir:

- Yüksek maliyetli bir teknoloji olmaları.
- Hidrojen altyapısının henüz yeterince gelişmemiş olması.
- Seri üretimin istenen düzeyde yaygınlaşmamış olması.
- Bazı yakıt türlerinin saflık gereksiniminin yüksek olması.

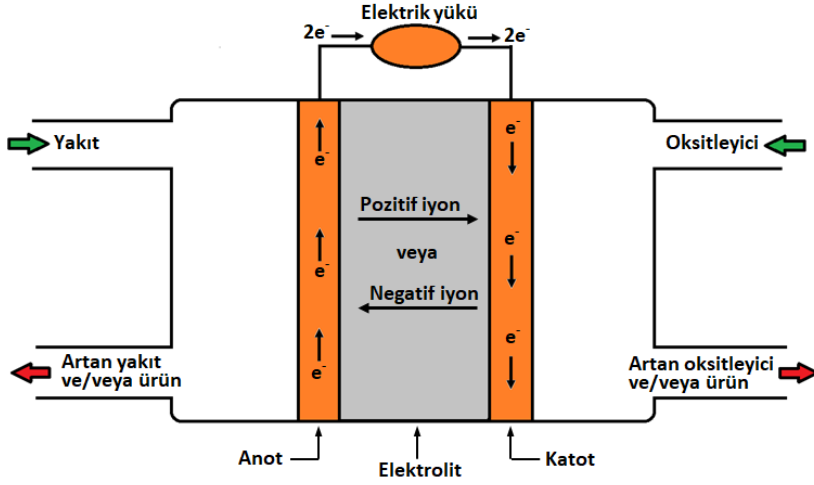
Yakıt pillerinin temel çalışma prensibi Şekil 11'de görülmektedir. Reaksiyon odasında bulunan elektrolitin her iki yanında bir anot ve bir katot yer almaktadır. Anot bölgesine verilen hidrojen, katalizör yardımıyla elektron ve protonlarına ayrılır. Elektronlar dış devre üzerinden ilerleyerek elektrik akımını oluşturur; protonlar ise elektrolit üzerinden katoda geçer ve burada oksijenle birleşerek su ve ısı açığa çıkarır.

Yakıt pilleri genellikle elektrolit türüne göre beş ana sınıfa ayrılır:

- ❖ Fosforik asit yakıt pili (FAYP)
- ❖ Polimer elektrolit membran yakıt pili (PEMYP)
- ❖ Alkali yakıt pili (AYP)
- ❖ Erimiş karbonat yakıt pili (EKYP)

❖ Katı oksit yakıt pili (KOYP)

Bu yakıt pillerinin karşılaştırmalı özellikleri Tablo 1’de ayrıntılı şekilde verilmiştir.



Şekil 11. Yakıt pilinin genel yapısı

Tablo 1. Yakıt pili çeşitleri ve özellikleri

Yakıt Pili Türü	FAYP	PEMYP	AYP	EKYP	KOYP
Elektrolit	Sıvı fosforik asit	Katı polimer membran	KOH	Sıvı erimiş karbonat	Y ₂ O ₃ içeren zirkonya
Mobil İyon	H ⁺	H ⁺	OH ⁻	CO ₃ ⁻²	O ⁻²
Çalışma sıcaklığı	160-220 °C	30-100 °C	60-250 °C	600-800 °C	600-1000 °C
Yakıt	H ₂	H ₂	H ₂	H ₂ , CO	H ₂ , CO, CH ₄
Verim	%55	%45-60	%40-60	%60-65	%55-65
Katalizör	Pt	Pt	Pt	Ni	CoZrO ₂ , NiZrO ₂ ve LaMnO ₃
Yakıt ıslahı	Pil dışı	Pil dışı	Pil dışı	Pil içi	Pil içi
Avantajları	•Düşük saflıkta hidrojen gereksinimi •Sıvı elektrolitle yüksek temas •Kullanılabilir atık ısı	•Düşük çalışma sıcaklığı •Yüksek enerji yoğunluğu •Hafif olmaları •Hızlı devreye alınabilme •Katı elektrolit	•Katottaki düşük aktivasyon kayıpları •Sıvı elektrolitle yüksek temas	•Yüksek verim •Yakıt esnekliği •Ucuz katalizör •Sıvı elektrolitle yüksek temas •Yüksek kullanılabilirliğe sahip atık ısı	•Yüksek verim •Yakıt esnekliği •Ucuz katalizör •Katı elektrolit •Yüksek kullanılabilirliğe sahip atık ısı
Dezavantajları	•Pahalı katalizör •Düşük enerji yoğunluğu •Elektrolit kaybı	•Çok saf H₂ •Pahalı katalizör	•Çok saf H₂ •Pahalı katalizör	•Yüksek çalışma sıcaklığı •Korozyon riski	•Yüksek çalışma sıcaklığı •Korozyon riski •Üretimi zor ve pahalı

•Zor devreye
alınabilme

**Uygulama
alanları**

•Düşük enerji
yoğunluğu
gerekli
uygulamalar

•Portatif sistemler
•Jeneratörler
•Askeri sistemler

•Uzay
araçları

•Elektrik
santralleri

•Elektrik santralleri
•Orta ölçekli işletmeler
için ısı ve elektrik
•Portatif sistemler

(EG&G Technical Services, 2004; Li, 2018; Mench, 2008)

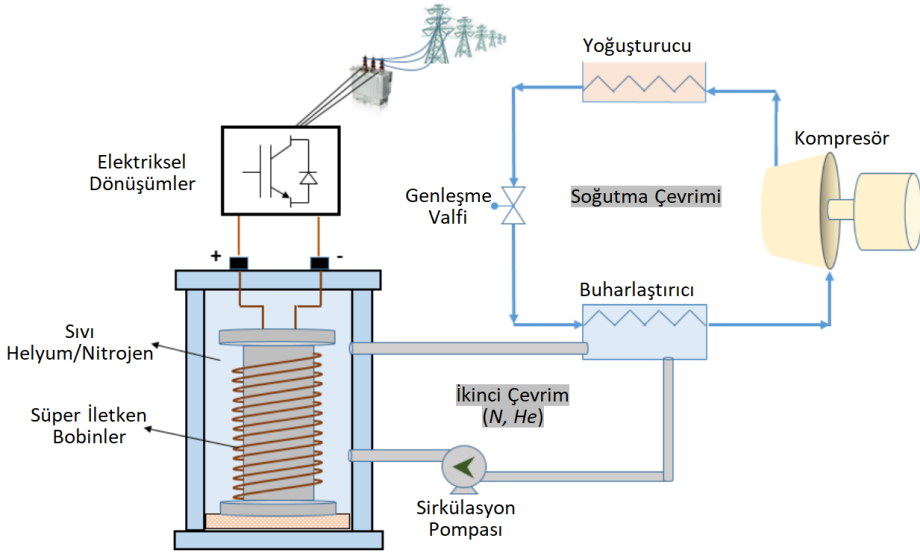
Süperiletken Manyetik Enerji Depolama

Süperiletken manyetik enerji depolama (SMES) sistemi, elektrik akımının süperiletken bir bobin içinde oluşturduğu manyetik alanın enerji depolamak için kullanıldığı bir teknolojidir. SMES yapısında süperiletken bobinin yanı sıra, bobinin düşük sıcaklıklarda süperiletkenliğini korumasını sağlayan kriyojenik soğutma sistemi ve akım-akım dönüşümlerini yöneten güç elektroniği birimi bulunur.

Süperiletken malzemelerin elektrik direncinin neredeyse sıfıra düşmesi sayesinde, bobinden geçen akım teorik olarak uzun süre kayıpsız şekilde korunabilir. Bu nedenle SMES sistemleri enerji depolama teknolojileri arasında en yüksek verime sahip olanlardan biridir. Süperiletken manyetik enerji depolama sisteminin çalışma yapısı şematik olarak Şekil 12 ‘ de verilmiştir.

Bu sistemlerin başlıca avantajları şunlardır:

- Verimleri yaklaşık %97’lik bir oranda oldukça yüksektir.
- Milisaniyeler mertebesinde tepki verebilirler.
- Aktif ve reaktif güç ayrı ayrı kontrol edilebilir.
- Sistem ömürleri uzundur ve performansları zamanla düşmez.



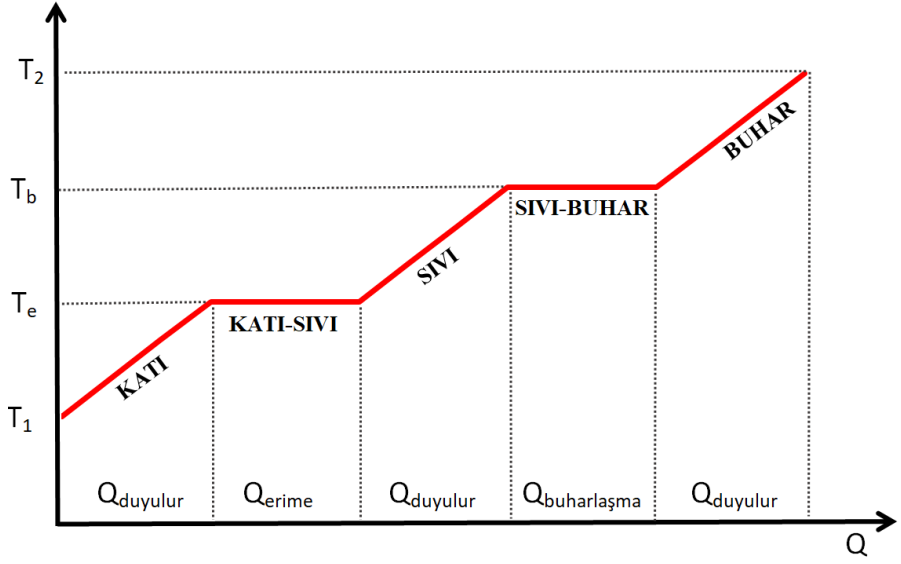
Şekil 12. Süperiletken manyetik enerji depolama sisteminin çalışma yapısı (Nikolaidis & Poulikkas, 2017)

Isı Enerjisinin Depolanması

Isı enerjisi, bir maddedeki moleküllerin sahip olduğu kinetik ve potansiyel enerji bileşenlerinin toplamı olarak tanımlanabilir. Isı depolama yöntemleri genel olarak üç ana grupta incelenmektedir: duyulur ısı depolama, gizli ısı depolama ve kimyasal reaksiyon ısısı ile depolama. Duyulur ısı depolamada, depolama malzemesinin sıcaklığı değiştirilerek enerji depolanır. Bu yöntem; sıvılar, katılar veya katı-sıvı karışımı hibrit malzemeler kullanılarak uygulanabilmektedir.

Gizli ısı depolama tekniğinde ise, faz değiştiren malzemelerden yararlanılır. Bu tür malzemelerle çalışırken doğru faz değişim sıcaklık aralığının seçilmesi büyük önem taşır. Duyulur ve gizli ısı depolama kavramlarının karşılaştırmalı gösterimi Şekil 13'te sunulmuştur. Gizli ısı depolamada, özellikle katı-sıvı faz değişimi sırasında faz değiştiren malzemenin absorbe edebildiği ısı miktarı ne kadar yüksekse, depolama performansı da o kadar artmaktadır.

Termokimyasal ısı depolamada ise ısı enerjisi, bir bileşiğin kimyasal bağ enerjisi biçiminde depolanır ve tersinir kimyasal tepkimelerle bu enerji tekrar açığa çıkarılabilir.



Şekil 13. Duyulur ve gizli ısı depolama

Isı enerjisi depolama uygulamalarında, depolamanın hedeflendiği süreye bağlı olarak kısa süreli veya uzun süreli depolama tasarlanabilir. Örneğin yaz–kış (mevsimsel) ölçekli depolama uzun süreli olarak değerlendirilirken; gece–gündüz arasındaki depolama kısa süreli depolama kapsamına girer. Gündüz yakılan bir sobadan elde edilen ısının depolanarak akşam saatlerinde yeniden kullanılabilmesi kısa süreli depolamaya verilebilecek basit bir örnektir.

Her zaman istenilen anda enerjiye erişim mümkün olmayabileceğinden, insanlar hem sıcak hem soğuk hem de sıcak–soğuk kombinasyonlu depolama çözümleri geliştirmiştir. Böylece yaz döneminde elde edilen ısı enerjisinin kışın kullanılması veya bunun tersi mümkün hâle gelmiştir. Isı enerjisi depolama, belirli bir zaman aralığında düzenli ve güvenilir enerji arzı sağlayabilmek açısından büyük önem taşımaktadır.

Bir ısı depolama sistemi tasarlanırken dikkate alınması gereken temel parametreler ise şunlardır:

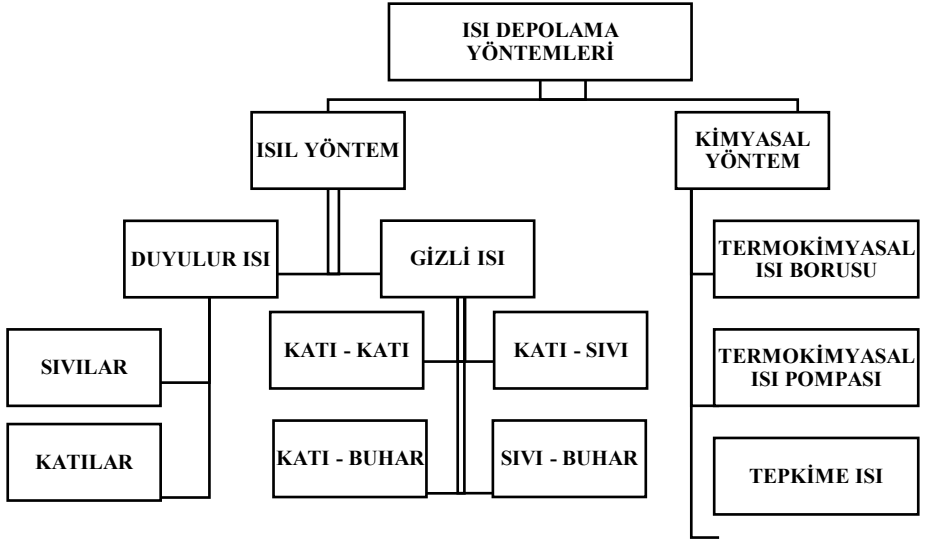
- Birim hacimde depolanabilen enerji miktarı
- Çalışma sıcaklık aralığı
- Depolama ünitesi içerisindeki sıcaklık tabakalaşması
- Depolama tankının dış kabuğunda kullanılacak malzeme seçimi
- Depolama ünitesinin ısı kayıplarının en aza indirilmesi
- Toplam sistem maliyeti

Uygun depolama malzemeleri kullanılarak, bu malzemelerin ısıtılması veya soğutulması yoluyla enerji depolanabilmektedir. Bu prensiple çalışan sistemlere

ısıl enerji depolama sistemleri denir. Isıl enerji depolama sistemleri, üretimin yoğun olduğu zamanlarda enerjiyi depolayıp, talebin arttığı dönemlerde bu enerjiyi geri verebilme özelliğine sahiptir. Bu yöntem enerji tüketiminin azaltılmasına, CO₂ emisyonlarının düşürülmesine ve enerji maliyetlerinin azaltılmasına önemli katkılar sağlar.

Bu depolama yönteminde, depolanan ısıl enerji çoğunlukla tekrar ısıl enerji şeklinde kullanılmaktadır. Dolayısıyla gereksiz enerji dönüşüm süreçleri ortadan kalkar ve her çevrimde oluşabilecek ek verim kayıpları önlenmiş olur. Özellikle güneş enerjisinin ısıl formda depolanabilmesi, güneş enerjisinden yararlanmayı hem kolaylaştırmış hem de yaygınlaştırmıştır.

Isı enerjisi depolama yöntemleri, genel olarak ısıl yöntem ve kimyasal yöntem diye iki ana başlık altında sınıflandırılmaktadır: Isı depolama yöntemlerinin sınıflandırılması Şekil 14’te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 14. Isı depolama yöntemleri

Maddenin faz değiştirmedeği ve dışarıdan alınan enerjinin yalnızca sıcaklığında değişime yol açtığı depolama şekli duyulur ısı depolama olarak adlandırılır. Duyulur ısı depolama, katı, sıvı ve gaz hâlindeki malzemelerle gerçekleştirilebilir.

Buna karşın, maddenin hal değişimi sırasında, sıcaklık sabit ya da çok az değişirken depolanan enerjiye dayanan yöntem ise gizli ısı depolama yöntemi olarak tanımlanır.

Isı depolama yöntemi seçilirken; depolamanın ne kadar süreyle yapılacağı, işletme koşulları ve sistemin ekonomikliğı öne çıkan belirleyici faktörlerdir. Isı depolama sistemi tasarımında yalnızca depolama metodu değil, bununla birlikte pek çok ek değişken de rol oynamaktadır. Bunlar arasında:

- Kurulacak sistemin yatırım maliyeti,
- Sistemin kurulacağı bölgenin iklim ve çevre koşulları,
- Isı yalıtımı ve ısı kayıplarına karşı alınacak önlemler,
- Depolama hacminin (tank veya depo) boyutlandırılması,
- Çalışma sıcaklık aralığı ve sıcaklık farkı,
- Isı depolama yöntemi, ısının geri kazanım yöntemi ve bu yöntemlerin çalışma sıcaklıkları,
- Kullanılacak malzemenin ısı depolama kapasitesi,
- Depolama ve geri kazanım esnasında harcanacak enerji miktarı,
- Depolama tankının geometrisi ve boyutları sayılabilir.

Isıl depolama tekniğine dayalı bir sistem tasarlanırken, istenen özellikler aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Isı depolama malzemesi mümkün olduğunca yanıcı ve toksik olmamalıdır.
- Depolama malzemesinin korozyon etkisi düşük olmalıdır.
- Depolanan ısının geri kullanım oranı yüksek olmalıdır.
- Sistem bileşenleri ve depolama malzemeleri düşük maliyetli ve uzun ömürlü olmalıdır.
- Yüksek ısı kapasiteye sahip malzemeler tercih edilmelidir.
- Depolama malzemesi, sistemin çalışma sıcaklık aralığına uygun seçilmelidir.
- Malzeme, defalarca ısıtma–soğutma çevrimine maruz kaldığında belirgin verim kaybı göstermemelidir.
- Isı depolama malzemesinin ısı iletkenliğı yeterli düzeyde olmalıdır.

Duyulur Isı Depolama

Duyulur ısı depolama, bir maddenin faz değiştirmeden, yalnızca sıcaklığının yükselmesi veya düşmesi sonucu ısı depolaması olarak tanımlanabilir. Seçilecek depolama malzemesinin korozyon olmaması sistemin uzun ömürlü çalışmasına katkı sağlar. Yanıcı veya kolay alev alan malzemelerin kullanılması ise güvenlik açısından önemli risk oluşturur. Düşük korozyon etkisi, kolay temin edilebilirlik, yüksek ısı kapasite ve yüksek çevrim sayısı sebebiyle su ve çakıl taşları, duyulur ısı depolama için uygun malzemeler arasında sayılmaktadır. Bazı duyulur ısı depolama malzemelerinin özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. 300 K sıcaklığında bazı depolama malzemelerinin özellikleri

Malzeme	Yoğunluk [kg/m ³]	Özgül [J/kgK]	Isı Isı [10 ⁶ * J/m ³ K]	Kapasitesi
Balçık	1458	879	1,28	
Tuğla	1800	837	1,51	
Kumtaşı	2200	712	1,57	
Odun	700	2390	1,67	
Beton	2000	880	1,76	
Cam	2710	837	2,27	
Alüminyum	2710	896	2,43	
Demir	7900	452	3,57	
Çelik	7840	465	3,68	
Çakıl taşı	2050	1840	3,77	
Manyetit	5177	752	3,89	
Su	988	4182	4,17	

(Dinçer, 2002)

Katı Maddelerde Duyulur Isı Depolama

Belirgin bir donma veya kaynama noktası göstermeyen bazı katı malzemeler, hem düşük hem de yüksek sıcaklıklarda ısı enerji depolama amacıyla kullanılmaktadır. Çakıl taşı, kaya gibi katı depolama malzemeleri doğada bol miktarda bulunmaları ve düşük maliyetleri nedeniyle tercih edilen materyallerdir. Ayrıca bu malzemeler düşük buhar basıncına ve kimyasal açıdan inert özelliklere sahiptir. Buna karşın, özgül ısı kapasiteleri ve ısı iletkenlikleri görece düşük olduğundan, ısı depolama sistemlerinin tasarımında bu özellikler göz önünde bulundurulmalıdır.

Isıl depolama malzemesi seçilirken en önemli kriterlerden biri ısı kapasitesidir. Çelik ve dökme demir gibi yüksek ısı kapasitesine sahip malzemeler pahalı oldukları için yaygın olarak tercih edilmemektedir. Bu nedenle genellikle daha ekonomik ve kolay bulunabilen çakıl taşı veya kaya parçaları depolama ortamı olarak kullanılır.

Katı ortamlı depolama sistemleri düşük sıcaklıklarda tasarlandığında, ısı transfer akışkanı olarak yoğunlukla hava tercih edilmektedir. Hava akışı kesildiğinde, durağan havanın ısı iletkenliğinin düşük olması sistemin yalıtım maliyetini azaltmaktadır. Büyük hacimli depolar genellikle yer altına inşa edilir. Böyle sistemlerde depolanan toplam enerji; kullanılan malzemenin termofiziksel özelliklerine, depo geometrisine, yoğunluğa ve ısı transfer akışkanının özelliklerine bağlıdır.

Çakıl taşlarının depolama ortamı olarak kullanıldığı bir sistemde; depolama tankı, taşları tutan gözenekli yapı ve havanın giriş-çıkış yaptığı kanallar yer alır.

Hava, depolama malzemesi ile temas ederek ısınıp bırakır veya alır ve böylece ısı depolama işlemi gerçekleşir. Bu tür sistemlerin avantajları şu şekilde özetlenebilir.

- Hem düşük hem de yüksek sıcaklıklarda çalışabilme imkânı sağlarlar.
- Kullanılan depolama malzemesi yanıcı veya alev alıcı değildir; korozif ve toksik etkileri yok denecek kadar azdır.
- Doğada bol bulunmaları ve ucuz olmaları önemli bir maliyet avantajı sunar.
- Taşların birbirleri ve depo duvarlarıyla temas yüzeyleri küçük olduğundan, iletimle meydana gelebilecek ısı kayıpları sınırlıdır.
- Isı transfer akışkanı olarak gaz kullanıldığında, donma sonucu hacim artışı veya kaynama sonucu yüksek basınç gibi riskler ortadan kalkar.
- Hava, kimyasal olarak aşırı korozif bir ortam oluşturmaz.
- Depolama malzemesinin akışkanla temas yüzeyinin geniş olması ısı transferini iyileştirir.

Dezavantajları ise şunlardır:

- Isı transfer akışkanı genellikle doğal dolaşım ile hareket etmez; bu nedenle sisteme fan veya blower gibi sirkülasyon elemanlarının eklenmesi gerekir.
- Çakıl taşı gibi malzemelerin kullanıldığı depolama tanklarının temizlenmesi zor ve maliyetlidir.
- Uygun şekilde bakım yapılmayan depolarda; küflenme, yoğunlaşma, toz birikimi ve haşere problemi gibi istenmeyen durumlar ortaya çıkabilir.
- Akış sırasında yüksek basınç kayıpları yaşanabileceği için fan ve sirkülasyon maliyetleri artar.
- Isı kapasitesi su veya bazı kimyasal depolama malzemelerine göre daha düşük olduğundan, aynı enerji için daha büyük depo hacmi gerekir.

Sıvı Maddelerde Duyulur Isı Depolama

Birçok sıvı, termofiziksel özellikleri itibarıyla duyulur ısı depolama amacıyla kullanılmaya uygundur. Tablo 3'te yaygın bazı sıvı malzemelerin termofiziksel özellikleri verilmektedir. Sıvılarla ısı depolama sistemleri genellikle basit ve uygulanabilir bir tasarıma sahiptir.

Doğada en çok bulunan sıvı olan su, yüksek özgül ısı sayesinde ısı depolama uygulamalarında önemli bir avantaj sunar. Su için tasarlanan depolama tankları, suyun korozif etkisi dikkate alınarak malzeme seçimi yapılmalı ve yeterli ısı yalıtımı sağlanacak şekilde projelendirilmelidir. Su ile ısı depolamanın zorlaştığı, yaklaşık 350 °C civarındaki sıcaklıkların üzerinde ise farklı organik sıvılara başvurulmaktadır.

Organik sıvılar kullanılırken, üst çalışma sıcaklığı; tank malzemesinin kimyasal dayanımı ve depolama sıvısının fiziksel özellikleri tarafından belirlenir. Bu sıvıların özgül ısıları genellikle yüksektir. Buna karşın eriyik tuzlar, hacimsel ısı depolama kapasitesi bakımından organik sıvılardan daha avantajlıdır. Orta sıcaklık uygulamalarında organik sıvılar görece pahalı olmalarına rağmen, basınçlı kap gerektirmemeleri sebebiyle yaygın kullanım alanı bulmaktadır.

Eğer 200–800 °C sıcaklık aralığında depolama yapılacaksa, depolama ortamı olarak inorganik sıvılar (sıvı metaller ve eriyik tuzlar) tercih edilir. Sıvı metallerin korozyif etkileri düşüktür; özgül ısıları düşük olmasına rağmen ısı iletim katsayıları yüksektir. Yüksek sıcaklıklarda yüksek ısı transfer hızlarının istendiği uygulamalarda bu nedenle sıvı metaller uygun bir seçenektir.

Tablo 3. Bazı sıvıların termofiziksel özellikleri ayrıntılı olarak verilmiştir

Sıvı Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Özgül (kJ/kgK)	Isı
Su	1000	4,19	
Su-Etilen glikol 50/50	1050	3,48	
Caloria HT 43*	-	2,30	
Dowterms A*	867	2,20	
Therminol 55*	-	2,40	
Therminol 66*	750	2,10	
Etilen Glikol	1116	2,38	
Hitec**	1680	1,56	
Draw**	1733	1,55	
Lityum***	510	4,19	
Sodyum***	960	1,30	
Etanol	790	2,40	
Propil asit	800	2,50	
Bütanol	809	2,40	
İzobütanol	808	3,00	
İzopentanol	831	2,20	
Oktan	704	2,40	

*Madeni yağ, **Erimiş tuz, ***Sıvı metal (Arda, 2006)

Su, sıvılar arasında duyulur ısı depolamasında en yaygın kullanılan malzemelerden biridir. Suyun depolama materyali olarak kullanılmasının aşağıdaki avantajları bulunmaktadır:

- Yüksek ısı depolama kapasitesine sahiptir.
- Doğada bol bulunur, kolay temin edilir ve ucuzdur.
- Termodinamik, fiziksel ve kimyasal özellikleri iyi bilinir; ısı transferi ve akışkanlar mekaniği davranışı ayrıntılı şekilde çalışılmıştır.

- Yanıcı, alev alıcı veya zehirleyici değildir.
- Birçok uygulamada hem depolama malzemesi hem de ısı transfer akışkanı olarak kullanılabilir.
- Çalışma sıcaklığı aralığında buhar-sıvı dengesi stabildir.
- Korozi olmasına rağmen, uygun inhibitörler kullanılarak bu etki azaltılmaktadır.

Buna karşılık bazı dezavantajları da vardır:

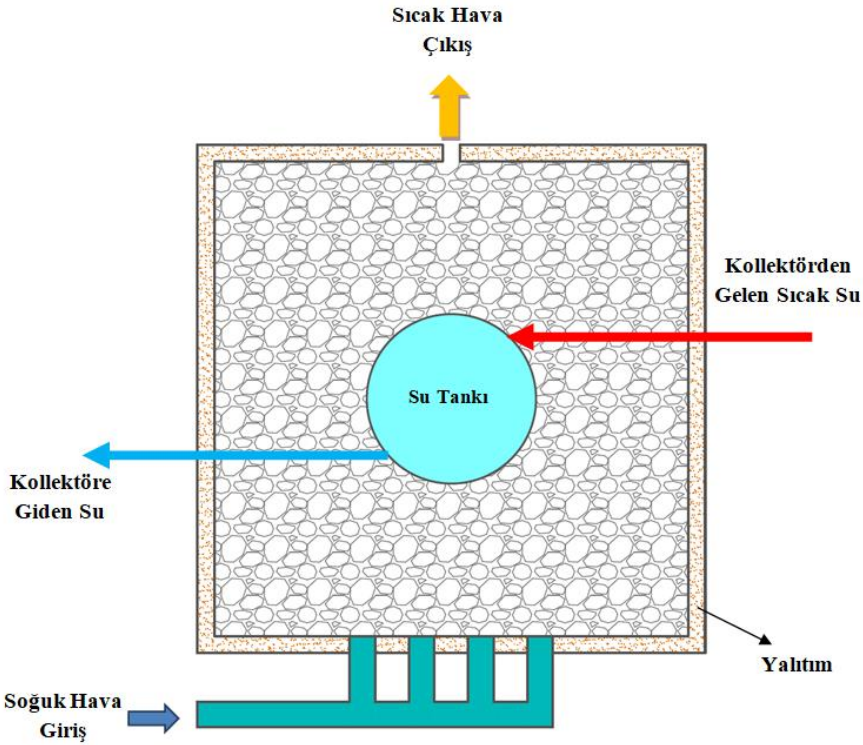
- Donma durumunda hacminin artması, depolama tankı üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir; bu nedenle donmaya karşı önlem almak gerekir.
- Korozi özelliği bulunduğundan, depolama tankları ya korozyona dayanıklı malzemelerden üretilmeli ya da inhibitör kullanılmalıdır.
- Yüksek sıcaklıklarda buhar basıncının artması, ısının güvenli şekilde depolanmasını zorlaştırır.

Katı ve Sıvı Maddeleri Kullanarak Duyulur Isı Depolama

Duyulur ısı depolama sistemlerinin verimi, katı ve sıvı depolama materyalleri birlikte kullanılarak yükseltilmektedir. Örneğin, merkezde su dolu bir tankın, çevresinde çakıl taşları veya kayaçların bulunduğu bir düzenek bu tür tasarımlara örnek olarak gösterilebilir.

Bu yaklaşıma örnek olarak Harry Thomasson tarafından geliştirilen bir sistem verilebilir. Şekil 15'te bu tasarıma ait örnek bir uygulama şematik olarak gösterilmektedir. Sistemde, üstteki kolektörlerden gelen ve ısı kaynağından aldığı enerjiyi taşıyan su, merkezde bulunan tanka giriş yapar; ısınıp aktardıktan sonra alttaki kolektörlerden sistemi terk eder. Su tankının etrafı kayaçlarla çevrilidir ve hava bu kayaçlarla temas ederek ısınır.

Bu sistemin başlıca avantajı, yüksek ısı kapasitesine sahip suyun depolama ortamı olarak kullanılması ile, geniş yüzey alanına sahip kayaçların hava ile temas ederek ısı transferini güçlendirmesinin bir arada sağlanmasıdır.



Şekil 15. Harry Thomasson'ın tasarladığı ısı depolama sistemi (Karaipekli, 2006)

Gizli Isı Depolama

Bir maddenin faz değişimi sırasında ortamdan aldığı veya ortama verdiği enerjiye gizli ısı denir. Faz değişimiyle enerji depolayan sistemler ise gizli ısı depolama sistemleri olarak adlandırılır. Gizli ısı depolama; katı–katı, katı–sıvı, sıvı–gaz ve gaz–katı faz dönüşümleri sırasında gerçekleşebilir.

Katı–katı faz dönüşümlerinde, kristal yapıdaki değişim sayesinde enerji depolanırken; katı–gaz ve sıvı–gaz dönüşümlerinde, malzemenin gaz fazında depolanması gerektiği için çok büyük hacimlere ihtiyaç duyulur ve bu da uygulamayı zorlaştırır. Bu sebeple ısı depolama amacıyla en çok katı–sıvı faz değişimi tercih edilir.

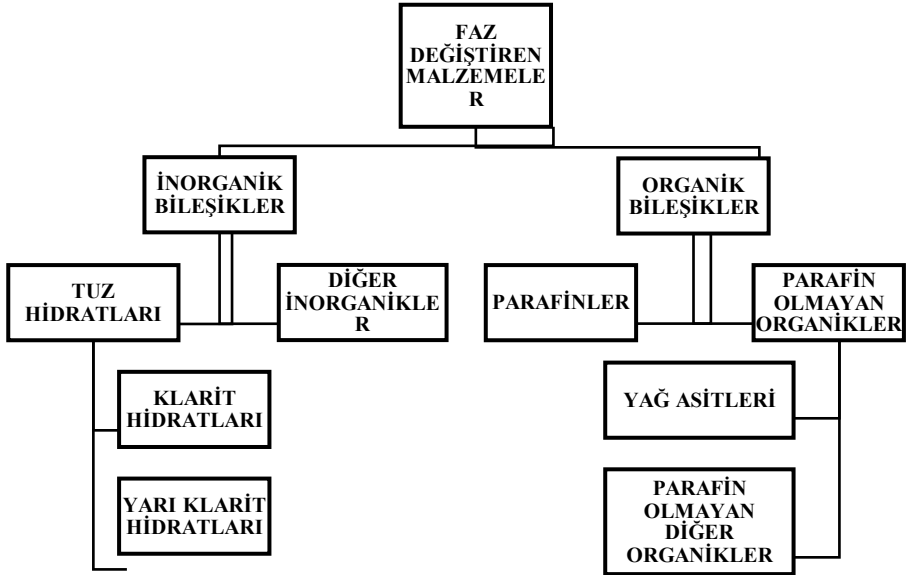
Tüm maddeler faz değiştirirken belirli bir iç enerji değişimi gösterir. Faz değişimi sırasında sıcaklık genellikle sabit kalır ya da çok az değişir; buna karşın iç enerjide belirgin bir değişim söz konusudur. Ancak her maddenin faz değişim sıcaklığının istenen uygulama aralığına denk gelmediği unutulmamalıdır.

Katı hâlden sıvı hâle geçiş yapan malzemeler, hem gizli ısı depolama hem de duyulur ısı depolama malzemesi olarak kullanılabilir. Aynı miktardaki enerjiyi yalnızca duyulur ısı depolama yöntemiyle depolamak istendiğinde, gizli ısı

depolama sistemine göre yaklaşık 4–5 kat daha büyük bir hacme ihtiyaç duyulabilmektedir. Örneğin, belirli bir kütledeki buzı eritmek için gereken enerji, aynı kütledeki suyun sıcaklığını yaklaşık 80 °C artırmak için gereken enerjiye denktir. Bu nedenle faz değıştiren malzemeler (FDM) ile yapılan gizli ısı depolama sistemleri, kompakt ısı deposu tasarımlarında büyük avantajlar sunar.

Gizli ısı depolama yöntemleri; sınırlı hacimlerde yüksek enerji depolama gereksinimi olduğunda, sıcaklık değışim aralığının dar tutulmak istendiğı durumlarda ve kısa süreli depolama senaryolarında özellikle tercih edilir. Bu sistemlerin tasarımında iki temel unsur öne çıkar: faz değıştiren malzeme ve bu malzeme ile ısı transferini sağlayan ortam.

Faz değıştiren malzemeler (FDM), faz değışimi esnasında sıcaklığı neredeyse sabit kalıp iç enerjisinde değışim meydana gelen ve bu sayede gizli ısı depolamaya imkân veren malzemelerdir. Bu malzemelerin en önemli tasarım parametrelerinden biri, erime sıcaklığıdır. FDM’lerin kullanılacağı sistemin çalışma sıcaklığı, malzemenin erime sıcaklığıyla uyumlu olmalıdır. FDM’ler genel olarak organik ve inorganik bileşikler olmak üzere iki ana sınıfta toplanır. Bu gruplandırma Şekil 16’da şematik olarak verilmiştir.



Şekil 16. Faz değışim malzemelerinin gruplandırılması

Parafinler, oda sıcaklığında çoğunlukla mum kıvamında olan ve yüksek oranda ağır hidrokarbon içeren faz değışim malzemeleridir. Petrol türevi ürünlerdir ve ana bileşen olarak “alkan” grubu bileşikleri içerirler. Genel formülleri C_nH_{2n+2} olan alkanlarda, karbon atomu sayısı erime sıcaklığı üzerinde

doğrudan etkilidir. Örneğin $n=1-4$ aralığındaki alkanlar oda sıcaklığında gaz, $n=5-15$ aralığındakiler sıvı, daha yüksek karbon sayılarına sahip olanlar ise mum kıvamındadır. Parafin mumunda alkan oranı çoğunlukla %75'in üzerindedir ve bu oran %100'e kadar çıkabilmektedir.

En bilinen parafinlerden biri oktadekan ($C_{18}H_{38}$)'dır ve saf bir parafin örneğidir. $C_{14}-C_{40}$ arasındaki alkanların erime sıcaklıkları yaklaşık $6-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığındadır. Alkanların gizli ısıları ve erime sıcaklıkları, karbon sayısıyla birlikte artma eğilimindedir.

Parafinlerin faz değişim malzemesi olarak tercih edilmesinde, yüksek erime ısıları ve uygun erime sıcaklık aralıklarına sahip olmaları belirleyici rol oynar. Tablo 4'te faz değişim malzemesi olarak kullanılabilen bazı parafinlerin özellikleri verilmiştir. Parafinlerin temini genellikle kolaydır; ancak maliyet açısından bazı tuz hidratlarına göre daha pahalı olabilirler. Buna karşın, tuz hidratlarının aksine korozif olmadıkları için metal tanklar içinde gizli ısı depolama uygulamalarında avantaj sağlarlar.

Parafinlerin faz değişim malzemesi olarak üstünlükleri şu şekilde sıralanabilir.

- Temin edilmesinde büyük bir zorluk yoktur.
- Geniş bir erime sıcaklığı aralığı sunarlar.
- Yüksek erime gizli ısısına sahiptirler.
- Korozif özellik göstermezler.
- Kimyasal olarak kararlıdır.
- Yoğunlukları düşüktür.
- Erime sırasında hacim değişimleri görece küçüktür.
- Buhar basınçları yüksek değildir.
- Toksik etkileri yoktur, insan sağlığı açısından görece güvenlidirler.
- Maliyetleri genel olarak kabul edilebilir düzeydedir.
- Aşırı soğuma eğilimi göstermedikleri için çekirdekleyici kullanımına çoğu durumda gerek yoktur.
- Erime sürecinde faz ayrışması gözlenmez.

Dezavantajları ise:

- Isıl iletkenliklerinin düşük olması nedeniyle ısı transfer mekanizmasının iyileştirilmeye ihtiyaç duyulması.
- Genel olarak erime sıcaklıklarının sabit olmaması.
- Yanıcı özellik taşımalarıdır.

Parafinlerin yanı sıra, bitkisel ve hayvansal yağlar ile bazı yağ asitleri de organik faz değişim malzemesi olarak ısı depolamada kullanılabilir.

İnorganik faz değişim malzemeleri arasında yer alan tuz hidratları, yüksek ısı depolama kapasiteleri sayesinde önemli bir alternatif oluşturmaktadır. Genellikle 60–150 °C aralığında çalışılan uygulamalarda tercih edilirler. Erime ve donma süreçlerinde hacim değişimlerinin düşük olması ve ısıl iletkenliklerinin parafinlere göre daha yüksek olması önemli avantajlarıdır. Buna karşın en belirgin dezavantajları, korozif olmalarıdır.

Bazı organik ve inorganik bileşiklerin ötektik karışımları da faz değişim malzemesi olarak kullanılabilir. Bu karışımların erime sıcaklıkları çoğunlukla istenen uygulama aralığına uygun hâle getirilebilir; ancak ötektik formda erime gizli ısısında azalma görülebilir. Bu azalmanın kabul edilebilir seviyede olup olmadığı, uygulamaya göre değerlendirilmelidir.

Tablo 4. Faz değişim materyali olarak tercih edilen bazı parafinlerin özellikleri

Bileşik	“C” atamu sayısı	Erime noktası [°C]	Yoğunluk [kg/m ³]	Isıl iletkenlik [W/Mk]	Gizli ısı [kJ/kg]
n-Dodekan	12	-12	750	(K)0,21	-
n-Tridekan	13	-6	756		-
n-Tetradekan	14	4,5-5,6	771		231
n-Pentadekan	15	10	768	0,17	207
n-Hekzadekan	16	18,2	774	(K)0,21	238
n-Heptadekan	17	22	778		215
n-Oktadekan	18	28,2	(K)814, (S)775	(K)0,35, (S)0,149	245
n-Nonadekan	19	31,9	(K)912, (S)769	(K)0,21	222
n-Eikosan	20	37			247
n-Heneikosan	21	41			215
n-Dokosan	22	44			249
n-Trikosan	23	47			234
n-Tetrakosan	24	51			255
n-Pentakosan	25	54			238
Parafin wax	-	32	(K)758, (S)749	(K)0,514, (S)0,224	251
n-Hekzakosan	26	56	7707	0,21	257
n-Heptakosan	27	59	773		236
n-Oktakosan	28	61	(K)910, (S)765		255
n-Nanokosan	29	64			240
n-Triakontan	30	65			252
n-Hentriakontan	31		(K)930, (S)830		-
n-Dotrikontan	32	70			-
n-Tritrikontan	33	71			189

*** K:katı S:sıvı (Karaipekli, 2006)

Nükleer Enerji Depolama

Nükleer enerji kullanımının temelleri, 1879'da uranyumun radyoaktif özelliklerinin keşfedilmesiyle atılmış, 1934 yılında atom çekirdeğinin kontrollü biçimde parçalanabilmesiyle birlikte nükleer enerjinin pratik olarak elde edilmesinin yolu açılmıştır. Ağır çekirdeklerin parçalanması (filyon) veya hafif çekirdeklerin kaynaşması (füzyon) sonucunda yüksek miktarda enerji açığa çıkmakta ve bu enerji günümüzde birçok ülkenin enerji portföyünde önemli bir yer tutmaktadır. Nükleer enerji artık yalnızca stratejik bir güç unsuru değil, aynı zamanda ticari enerji üretiminde yaygın kullanılan bir kaynak haline gelmiştir.

Nükleer santrallerde kullanılan yakıtlar, uzun yarı ömürlü radyonüklitler içerdiğinden, kullanım sonrası önemli miktarda radyoaktif atık oluşmaktadır. Kullanılmış nükleer yakıtların yeniden değerlendirilmesi iki temel yöntemle gerçekleştirilmektedir. İlk yöntemde, tüketilmiş yakıt kimyasal işleme tabi tutularak içindeki tekrar kullanılabilir uranyum ve plütonyum ayrıştırılır; geriye kalan yüksek seviyeli radyoaktif atık ise stabilize edilerek camlaştırma yöntemiyle depolamaya uygun hale getirilir. İkinci yöntem ise yakıtın herhangi bir işleme tabi tutulmadan doğrudan depolanmasıdır.

Depolanmasına karar verilen nükleer atıklar, sızdırmazlık özelliği yüksek ve mekanik dayanımı güçlü çelik kaplar içinde muhafaza edilir. Bu kaplar, güvenlik gereksinimlerine bağlı olarak yer üstünde veya yer altında özel tesislerde saklanabilir. Radyoaktif materyalin çevresel etkileri son derece büyük olabileceğinden, olası bir sızıntıya karşı güvenlik önlemlerinin üst düzeyde tutulması zorunludur. Bu nedenle yer altı depolama sistemleri, izolasyon avantajları ve jeolojik güvenlikleri nedeniyle günümüzde daha yaygın olarak tercih edilmekte ve uzun vadede daha güvenilir bir seçenek olarak değerlendirilmektedir.

Yer altı depolama tesisleri genellikle yer kabuğunun 600 ila 1000 metre derinliğinde, yer altı su kaynaklarından uzak, düşük sismik risk taşıyan bölgelerde inşa edilmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdiwe, R., A., Haider, M. (2016). A mathematical model for ammonia solar and synthesis reactors. *Renewables: Wind, Water, and Solar*, 3(12). doi:DOI 10.1186/s40807-016-0034-4
- Arda, K. (2006). *Güneş Enerjisinin Depolanması ve Isıl Analizi*. (Yüksek Lisans), Erciyes Üniversitesi,
- Dinçer, İ. (2002). Thermal energy storage and phase-change materials. *Course on Porous Media, Portugal*.
- EG&G Technical Services, Inc. (2004). *Fuel Cell Handbook*: U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy National Energy Technology Laboratory
- Karaipekli, A. (2006). *Faz Değişimli Enerji Depolama Maddelerinde Isıl İletkenliğin Zenginleştirilmesi* (Yüksek Lisans), Gaziosmanpaşa Üniversitesi
- Kozak, M., Kozak, Ş. (2012). Enerji Depolama Yöntemleri. *SDU International Technologic Science*, 4(2), 17–29.
- Li, X. (2018). *Principles of Fuel Cells*: Taylorfrancis.
- Mench, M., M. (2008). *Fuel Cell Engines*: Wiley.
- Nikolaïdis, P., & Poullikkas, A. (2017). A comparative review of electrical energy storage systems for better sustainability. *Journal of Power Technologies*, 97(3), 220–245.
- Phap, V. M., Sang, L. Q., Ninh, N. Q., Binh, D. V., Hung, B. B., Huyen, C. T. T., & Tung, N. T. (2022). Feasibility analysis of hydrogen production potential from rooftop solar power plant for industrial zones in Vietnam. *Energy Reports*, 8, 14089–14101. doi:10.1016/j.egyr.2022.10.337
- Tycorun, Battery Energy Storage Systems. (2025). Retrieved from <https://www.huntkeyenergystorage.com/ways-to-store-electricity/>
- Ünver, Ü., Bilgin, H., Güven, A. (2015). Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Sistemler. *Mühendis ve Makina*, 56(663), 57–64.
- Wang, J. B., Liu, X., Zhang, Q., Liu, X. R., Song, Z. P., & Feng, S. J. (2024). Fatigue properties and damage constitutive model of salt rock based on CT scanning. *International Journal of Mining Science and Technology*, 34(2), 245–259. doi:10.1016/j.ijmst.2024.01.002

BÖLÜM 26

Elektrikli Araçlarda Kullanılan Lityum-İyon Tabanlı Batarya Hücrelerin İncelenmesi

**Mehmet Akif Kılınç¹ & Ali Şentürk² &
Okan Bingöl³**

¹ Öğr. Gör., Afyonkarahisar Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Uzaktan Eğitim Uygulama ve Araştırma Merkezi, 0000-0001-8589-3837

² Dr. Öğr. Üyesi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, 0000-0002-5868-7365

³ Prof. Dr., Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, 0000-0001-9817-7266

1.GİRİŞ

Elektrikli araçlar (EV'ler), fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltma ve sürdürülebilir ulaşım hedeflerine ulaşma açısından küresel enerji geçişinin temel unsurları haline gelmiştir. Bu bağlamda, EV'lerin performansını, menzilini ve güvenliğini belirleyen en kritik bileşenlerden biri, enerji depolama sistemleri olarak kullanılan lityum-iyon bataryalardır. Söz konusu bataryaların temelini oluşturan hücre teknolojileri enerji yoğunluğu, güvenlik, maliyet ve verimlilik gibi faktörler üzerinden sürekli gelişmektedir. Nitekim hücre yapısının ve kimyasının doğru seçimi, EV'lerin rekabet gücünü doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada mevcut ticari hücrelerden, gelecek vadeden alternatiflere kadar kapsamlı bir analiz yapılması amaçlanmakta olup, yapılan analiz ile sektörün geleceğinin şekillendirilmesi hedeflenmektedir.

Çalışmada öncelikle EV'lerde yaygın olarak kullanılan lityum-iyon batarya hücrelerinin yapısal ve kimyasal özellikleri incelenmektedir. Hücre yapısı alt bölümünde, silindirik, kese tipi, prizmatik ve coin hücrelerin avantajları ve dezavantajları ile uygulama alanları tartışılmaktadır. Bu tartışma, enerji yoğunluğu, ısı yönetimi ve güvenlik gibi kriterler üzerinden gerçekleştirilmektedir. Ardından, EV'lerde tercih edilen hücre türleri alt bölümünde, LFP, NCA ve NMC kimyalarının özgül enerji, özgül güç, güvenlik, performans, ömür ve maliyet açısından karşılaştırılması yapılmaktadır. Bu karşılaştırma, üreticilerin stratejik kararlarını yönlendiren unsurları ortaya koymaktadır.

Çalışma kapsamında elektrikli araçlarda hücre türleri ve hücrelerin kimyasal yapıları analiz edilmektedir. Hücre türleri ve kimyasal yapılarının detaylıca ve karşılaştırmalı olarak incelenmesi ile elektrikli araçlara yönelik araştırmalara bütüncül bir perspektif sunulması hedeflenmektedir. Dolayısıyla bu çalışma, elektrikli araçların günümüz konumu ve geleceği açısından önem arz etmekte olup, gelecek çalışmalara ışık tutmayı amaçlamaktadır. Öte yandan, çalışma elektrikli ulaşım sektöründe daha güvenli, verimli ve çevre dostu çözümlerin geliştirilmesine katkıda bulunmayı hedeflemektedir.

2. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Hücre Yapısı

Bu bölümde, EV'ler de enerji depolama sistemlerinin temelini oluşturan lityum-iyon batarya hücrelerinin yapısal ve kimyasal özelliklerini incelenmektedir. Hücre teknolojilerinin gelişimi enerji yoğunluğu, güvenlik, maliyet ve performans gibi faktörler üzerinden değerlendirilmektedir. Bölüm, mevcut ticari hücrelerin kapsamlı bir analizini sunmaktadır. Bu analiz ile hücre teknolojilerinin EV performansını optimize etme potansiyeli ortaya çıkarılmaktadır. Yapılan analiz ile gelecek zamanlarda sürdürülebilirlik ve verimlilik odaklı yeniliklerin kritik rol oynayacağı öngörülmektedir. Dolayısıyla, hücre seçiminin üreticilerin stratejik kararlarını şekillendirdiği kanısına varılmaktadır.

2.1. Hücre Yapı Tipleri

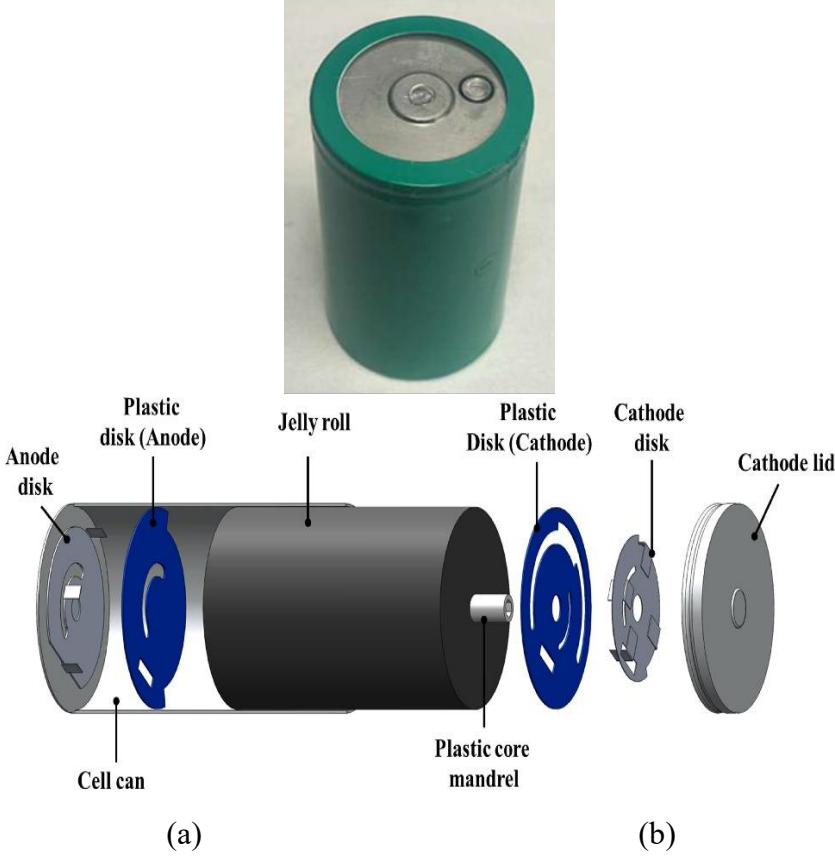
Lityum-iyon bataryaları (LIB'ler), elektrikli araçlardan elektronik cihazlara kadar geniş bir uygulama alanında kullanılan enerji depolama sistemleridir (Talha, 2025). Bu bataryalar, fiziksel yapılarına göre sınıflandırılmakta olup, temel olarak silindirik, madeni para, prizmatik ve kese hücre tipleri şeklinde kategorize edilmektedir. Bu sınıflandırma, bataryaların üretim, performans ve güvenlik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Alt bölümde, her bir tipin yapısı, avantajları, dezavantajları ve uygulama alanları akademik bir perspektifle ele alınmaktadır. Bu bağlamda, hücre tiplerinin karşılaştırılması enerji yoğunluğu, ısı yönetimi ve maliyet gibi faktörler üzerinden yapılacaktır (R. Chen, 2022; Z. Chen vd., 2022; Garole vd., 2020; Kaplan, 2025; Talha, 2025).

2.1.1. Silindirik Hücreler (Cylindrical Cells)

Silindirik hücreler, yuvarlak bir metal muhafaza içerisinde sıkıca sarılmış elektrotlarla karakterize edilen bir tasarım sergilemektedir. Bu yapı, tarihsel olarak 18650 formatıyla başlayan ve günümüzde 21700 veya 4680 gibi varyasyonlara evrilen bir gelişim sürecine sahiptir. (Baazouzi vd., 2023; Gustafsson, 2024; Waldmann vd., 2020). Silindirik hücrelerin temel avantajları arasında üretim kolaylığı, maliyet etkinliği, mekanik dayanıklılık ve etkili ısı yönetimi yer almaktadır. Bununla birlikte, enerji yoğunluğu diğer hücre tiplerine kıyasla daha düşük olup, paketleme verimliliği sınırlıdır. Silindirik hücreler, Tesla Model 3 ve Model X gibi araçlarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu tercihin en önemli sebebi ısı dağılımı ve modülerlik özelliklerinin, batarya paketlerinin güvenliğini artırmasıdır. Aynı zamanda, güvenlik riski açısından, silindirik hücreler en düşük riskli tip olarak değerlendirilmesinden dolayı avantajlıdır. (R. Chen, 2022; Y. Chen vd., 2021; Yeganehdoust vd., 2025). Şekil 1'de, BYD 4680 silindirik hücre (a) yapısı ve (b) bileşenleri sunulmaktadır. (A. Liu vd., 2025).

Şekil 1.

BYD 4680 silindirik hücre (a) yapısı ve (b) bileşenleri

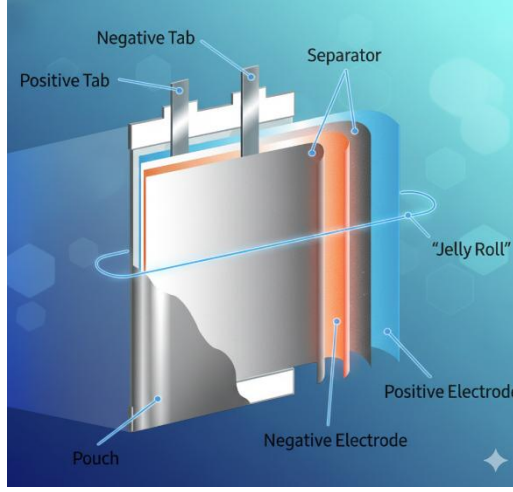


Kaynak: (Baazouzi vd., 2023; A. Liu vd., 2025)

2.1.2. Kese Tipi Hücreler (Pouch Cells)

Kese hücreleri, ince ve esnek alüminyum-plastik kompozit filmle kaplı olup, cihaz şekline uyum sağlayacak şekilde tasarlanmaktadır (Kaplan, 2025; Koech vd., 2024). Bu tipin öne çıkan avantajları arasında yüksek enerji yoğunluğu, hafiflik, tasarım özgürlüğü ve düşük iç direnç yer almaktadır. Ancak mekanik dayanıklılık eksikliği, şişme riski ve üretim karmaşıklığı gibi unsurlar, bu hücre tipinin dezavantajları olarak karşımıza çıkmaktadır. Kese tipi hücreler, SAIC Motor gibi üreticiler tarafından tercih edilmektedir. Çünkü bu hücreler şekil uyumluluğu sayesinde çeşitli cihazlara uyarlanabilmektedir. Bu uyarlama, ürünlerin pazar payını artırma da avantaj sağlamaktadır (Y. Chen vd., 2021; Ghani vd., 2024). Şekil 2’de kese hücre (a) yapısı ve (b) bileşenleri gösterilmiştir (Garole vd., 2020; Talha, 2025).

Şekil 2. Kese hücre (a) yapısı ve (b) bileşenleri



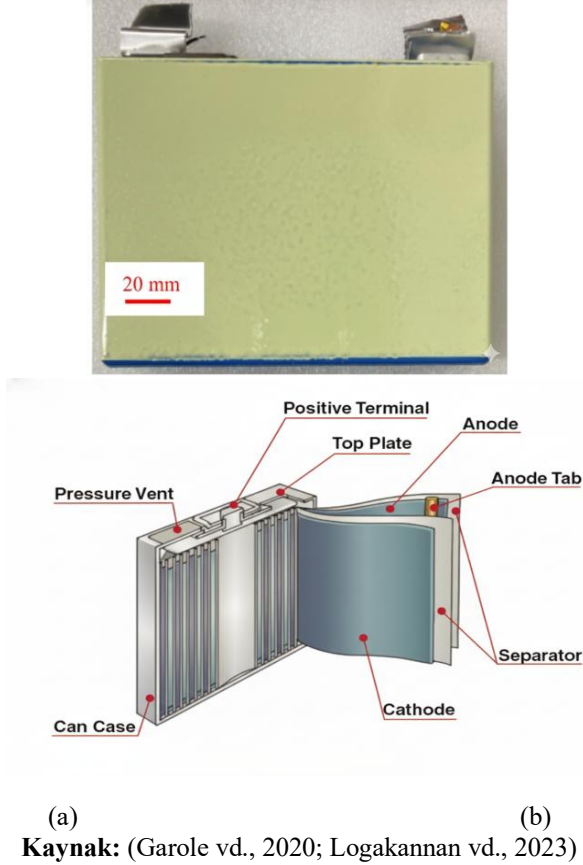
(a) (b)
Kaynak: (Garole vd., 2020; Talha, 2025)

2.1.3. Prizmatik Hücreler (Prismatic Cells)

Prizmatik hücreler, genellikle alüminyum alaşımlı dikdörtgen prizma şeklinde tasarlanmaktadır (R. Chen, 2022). Yüksek enerji kapasiteleri sayesinde, daha az sayıda hücre ile yüksek kapasiteli bataryaların üretilmesi mümkün hale gelmektedir. Bu hücrelerin temel avantajları arasında yüksek enerji yoğunluğu, kompakt yapısal tasarım ve kapasite esnekliği yer almaktadır (Y. Chen vd., 2021). Bununla birlikte yüksek maliyet, mekanik dayanıklılık sorunları ve ısı yönetim zorlukları bu hücrelerin dezavantajları arasında yer almaktadır (Y. Chen vd., 2021; Kaplan, 2025). Prizmatik hücreler, BYD Tang, Song ve Qin gibi elektrikli araç modellerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tercih, söz konusu hücrelerin yüksek kapasite gereksinimlerini karşılayarak batarya kararlılığını artırma potansiyeline sahip olmalarından kaynaklanmaktadır (Y.

Chen vd., 2021). Şekil 3'te prizmatik hücrenin (a) yapısı ve (b) bileşenleri gösterilmiştir (Garole vd., 2020; Logakannan vd., 2023).

Şekil 3. Prizmatik hücre (a) yapısı ve (b) bileşenleri

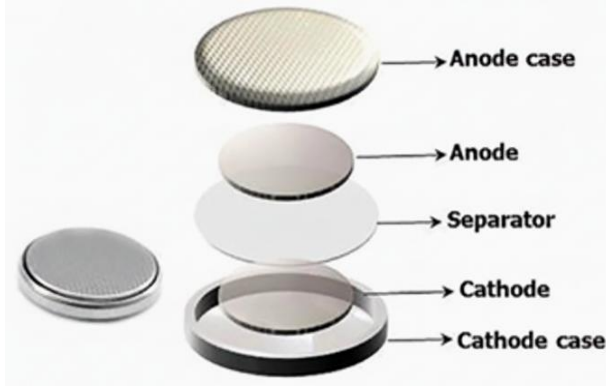


(a) (b)
Kaynak: (Garole vd., 2020; Logakannan vd., 2023)

2.1.4. Coin Hücreler (Coin Cells)

Coin hücreleri, küçük boyutlu ve laboratuvar testleri için uygun bir tasarımla öne çıkmaktadır (Y. Chen vd., 2021). Basit geometrileri sayesinde, bu hücreler hızlı ve maliyet etkin bir şekilde birleştirilmektedir. Bununla birlikte, yüksek kapasite gerektiren uygulamalarda yetersiz kalmaktadır. Coin hücrelerinin dezavantajları arasında sınırlı enerji depolama kapasitesi ve parazit reaksiyonlara karşı hassasiyet yer almaktadır. Söz konusu parazit reaksiyonlar, hücrenin verimliliğini ve ömrünü azaltmaktadır (Y. Chen vd., 2021; Talha, 2025). Bu bağlamda, bu hücreler öncelikle malzeme araştırmalarında kullanılmakta olup, ticari ürünlerde nadiren tercih edilmektedir (Talha, 2025). Şekil 4'de coin hücrenin yapısı ve bileşenleri gösterilmiştir (Z. Chen vd., 2022).

Şekil 4. Coin hücrenin yapısı ve bileşenleri



Kaynak: (Z. Chen vd., 2022)

2.1.5. Hücre Yapılarının Değerlendirilmesi

Hücre tipleri, uygulama alanlarına, enerji yoğunluklarına ve güvenlik gereksinimlerine göre seçilmektedir. Bu seçim, güç (hızlı şarj/deşarj) ve enerji yoğunluğu (menzil) açısından önemli farklılıklar ortaya koymaktadır. Örneğin, silindirik hücreler ısı yönetimi ve güvenliğinde üstünlük gösterirken, kese tipi hücreler esneklik açısından avantajlıdır. Buna karşılık, prizmatik hücreler kapasite açısından diğer hücrelere göre daha avantajlıdır. Otomotiv sektöründe bu tercih, üreticilerin entegrasyon teknolojisine bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, Tesla silindirik hücreleri tercih ederken, BYD prizmatik hücreleri kullanmaktadır. Gelecekte, hücre tasarımlarındaki yenilikler hücre-batarya teknolojisindeki verimliliği arttıracaktır. Böylece hücrelerin sürdürülebilirliği ve verimliliği artacak, elektrikli ulaşım ve enerji depolama sektörlerinde kritik bir rol üstlenecektir. Bununla birlikte, güvenlik açısından büyük hücre boyutları riski artırdığı için tasarım optimizasyonları kritik önem taşımaktadır.

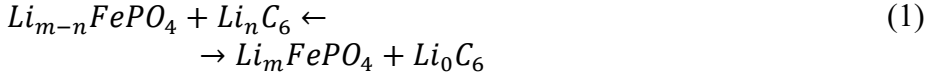
3. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Hücre Çeşitleri

EV'lerin enerji depolama sistemlerinde lityum-iyon bataryaları, yüksek enerji yoğunluğu ve özgül enerji değerleri sayesinde baskın bir rol oynamaktadır (Gustafsson, 2024). Bu bataryaların temel bileşenleri, lityum iyonlarının difüzyonunu sağlayan interkalasyon bileşikleri üzerine kurulmuştur (Gao vd., 2025). Katot malzemeleri açısından bakıldığında, ticari olarak yaygın kullanılan türler arasında lityum demir fosfat (LFP: LiFePO_4), lityum nikel mangan kobalt oksit (NMC: LiNiMnCoO_2) ve lityum nikel kobalt alüminyum oksit (NCA: LiNiCoAlO_2) bulunmaktadır (Gao vd., 2025; Madani vd., 2025). Bu hücre çeşitliliği, batarya hücrelerinin enerji yoğunluğunu artırmayı ve EV'lerin menzili iyileştirme potansiyelini vurgulamaktadır (Gao vd., 2025). Kullanım ömrü açısından, katot kimyalarının malzeme özelliklerinin, şarj/deşarj davranışları ve bozulma mekanizmalarına bağlı olarak farklılaştığı

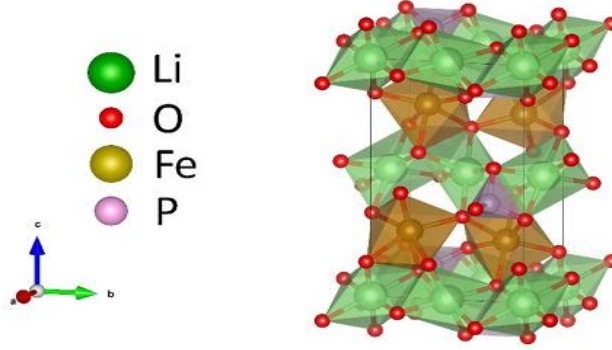
görülmektedir. Örneğin, NCA katotlu hücreler katı çözelti yapısı sayesinde yüksek enerji yoğunluğu ve güç kapasitesi sunarken, yüksek sıcaklıklarda termal stabilite sorunları nedeniyle kapasite kaybına yol açmaktadır (Madani vd., 2025). Karşılaştırmalı olarak, NMC katotları da katı çözelti yapısına sahip olup NCA'ya benzer yüksek enerji yoğunluğu sağlamaktadır. Ancak daha dengeli bozulma profiline sahip olup uzun döngü ömrü sunmaktadır. LFP katotları ise olivin yapısı sayesinde mekanik dayanıklılık ve termal stabilite açısından üstünlük göstermektedir (Koech vd., 2024; Madani vd., 2025). LFP katotları yüksek sıcaklık ve şarj durumu (SoC: State of Charge) koşullarında dirençli olmasına rağmen, enerji yoğunluğu NCA ve NMC'ye kıyasla düşüktür. Sonuç olarak, lityum-iyon hücre türlerinin seçimi, araç performansını doğrudan etkileyen bir faktördür (Madani vd., 2025; Stoyanov & Gueorgiev, 2025). Bu etkiyi daha iyi analiz edebilmek için alt bölümde LFP, NCA ve NMC hücre türleri incelenecektir.

3.1. LFP Hücresi

LFP, LiFePO_4 formülüyle temsil edilen bir lityum-iyon batarya kimyasıdır ve olivin kristal yapısına sahip olmasıyla öne çıkmaktadır (Gustafsson, 2024; Koech vd., 2024; Talha, 2025). Bu yapı, tetrahedronları ve oktahedral katyon boşluklarından oluşan kristal kafes sayesinde Li^+ iyonlarının taşınmasına uygun bir ortam sağlamaktadır. Söz konusu yapı, bataryanın elektrokimyasal performansını ve güvenliğini belirleyen temel unsurlardan biridir. Bu yapıda oksijen (O_2) atomları altıgen bir kafes oluştururken, fosfat iyonları (P) tetrahedral (merkezde 1, çevrede 4 atom) boşlukları doldurmakta ve demir (Fe) ile lityum (Li) katyonları oktahedral (merkezde 1 atom, çevresinde 6 atom) koordinasyon bölgelerinde konumlanmaktadır. Lityum katyonlarının bulunduğu oktahedral boşluklar, kristal örgü boyunca uzanan sürekli ve paralel kanallar meydana getirerek iyon taşınımını kolaylaştırmaktadır (Julien vd., 2014; Talha, 2025). Bu özellik, hızlı şarj ve deşarj süreçlerinde önemli bir avantaj sunmaktadır. Bununla birlikte, iyonların elektrot malzemesine hızlı giriş ve çıkışı sırasında lityum, metastabil (katı içinde farklı bir elementin veya iyonun, kristal kafes yapısını bozmadan çözünmesi) ara faz olarak katı çözeltide bulunabilmektedir. Bu durum ise bataryanın yapısal ve elektrokimyasal kararlılığını etkileyebilmektedir (Koech vd., 2024). Genel hücre tepkimesi Eşitlik (1) ile ifade edilmektedir (Talha, 2025). Şekil 1'de LFP hücresinin katodundaki atomik yapısı ve iyon taşınımını sağlayan kristal düzenlemesi gösterilmiştir (Julien vd., 2014; Talha, 2025).



Şekil 1. LFP hücresinin katodundaki atomik yapısı ve iyon taşınımını sağlayan kristal düzenlemesi



Kaynak: (Julien vd., 2014; Talha, 2025)

LFP hücrelerinin geliştirilmesi, 1990'lı yıllarda kobalt ve manganez gibi malzemelerin yerine demir fosfatın kullanılmaya başlanmasıyla gerçekleşmiştir. Bu geçiş, bataryaların performans, güvenlik ve uzun ömür açısından cazip hale gelmesini sağlamıştır. Özellikle EV endüstrisi ve ticari enerji depolama pazarında öne çıkmalarının nedeni, düşük iç dirençleri ve uzun döngü ömürleridir (A. Liu vd., 2025; Stoyanov & Gueorgiev, 2025). Akademik araştırmalara göre, LFP bataryaları aşırı şarj koşullarında stabil kalmakta ve yüksek sıcaklıklarda bozulmadan çalışabilmektedir (Gao vd., 2025; Gustafsson, 2024; Stoyanov & Gueorgiev, 2025). Bu durum, termal kararlılık riskini minimize etmektedir. Üstelik, -30°C ile +60°C arasında geniş sıcaklık aralığında çalışabilmeleri, onları çeşitli endüstriyel uygulamalar için uygun kılmaktadır (Gao vd., 2025).

Avantajlarına bakıldığında, LFP hücreleri öncelikle güvenlik açısından üstünlük göstermektedir (Koech vd., 2024). Yüksek termal kararlılık ve düşük yanma riski sayesinde, LFP hücreleri diğer lityum-iyon kimyalarına kıyasla daha güvenilir hale gelmektedir. Bunun yanı sıra LFP hücrelerin uzun döngü ömrü, yüksek sıcaklıklarda stabil performans, hızlı şarj kapasitesi, düşük deşarj özelliği ve çevre dostu yapısı (kobalt içermemesi nedeniyle) dikkat çekmektedir (Gao vd., 2025; Gustafsson, 2024; Mauger & Julien, 2018). Örneğin, LFP hücrelerinin içinde demir ve fosfat gibi malzemelerin bol bulunması, tedarik zinciri sorunlarını azaltmaktadır. Ayrıca, yüksek deşarj akımı ve bakım kolaylığı, bu hücreleri enerji depolama sistemleri için ideal kılmaktadır (Mauger & Julien, 2018).

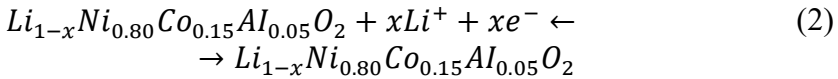
Dezavantajlarına bakıldığında, LFP hücrelerinin enerji yoğunluğu diğer lityum-iyon kimyalarına göre daha düşüktür. Bu da bu hücrelerin aynı enerji kapasitesi için daha büyük fiziksel boyut gerektirdiği anlamına gelmektedir

(Gustafsson, 2024; A. Liu vd., 2025). Bunun sonucu olarak, gerilim seviyeleri daha düşük olmakta ve seri bağlantıda daha fazla hücreye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum, tasarım karmaşıklığını artırmaktadır. Ayrıca, bu hücrelerin yavaş deşarj hızı ve daha büyük boyutta olmaları, bazı uygulamalarda sınırlamalar yaratabilmektedir (Gustafsson, 2024; Stoyanov & Gueorgiev, 2025). Akademik çalışmalar, LFP hücre bozulmasının öncelikle çevresel sıcaklık ve şarj gerilim limiti gibi faktörlerden etkilendiğini göstermektedir (Gao vd., 2025; Madani vd., 2025; Talha, 2025). Yüksek şarj gerilimi aktif lityum miktarını ve pozitif elektrot malzemelerinin bozulmasını hızlandırırken (Gao vd., 2025), yüksek şarj akımı negatif elektrot malzemelerinin bozulmasını tetiklemektedir (Madani vd., 2025).

Sonuç olarak, LFP hücreleri yüksek güvenlik ve uzun çevrim ömrü sunmaları nedeniyle tercih edilmektedir. Ancak görece düşük enerji yoğunlukları belirli performans sınırlamalarına yol açmaktadır. Olumlu ve olumsuz yönleri kıyaslandığında ise LFP'nin olivin kristal yapısı ve elektrokimyasal özellikleri sayesinde sürdürülebilir enerji depolama sistemlerinde önemli bir rol üstlendiği ortaya çıkmaktadır.

3.2. NCA Hücresi

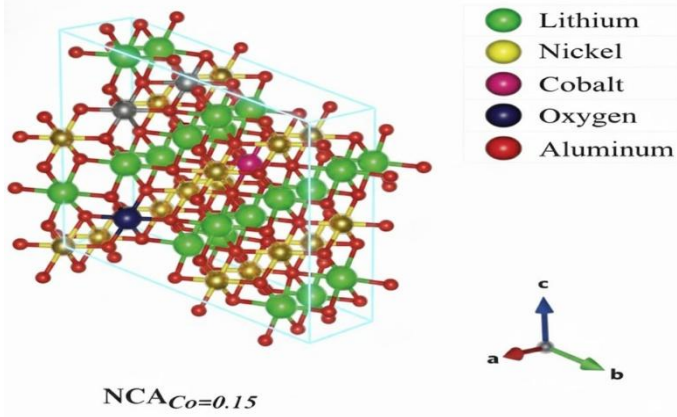
NCA, LiNiCoAlO_2 formülüyle temsil edilen bir lityum-iyon hücre kimyasıdır (Basile vd., 2025). Bu hücre türü, lityum-iyon batarya teknolojisinde önemli bir kategori olarak öne çıkmaktadır (Gustafsson, 2024). Temel olarak lityum nikel oksit (LiNiO_2) temelli bir yapıya dayanan NCA hücreleri, performans ve kararlılığı artırmak amacıyla kobalt (Co) ve alüminyum (Al) katkılarıyla geliştirilmiştir. Böylece, orijinal LiNiO_2 'nin yüksek kapasite potansiyeli korunurken, yapısal kararlılığı önemli ölçüde iyileştirilmiştir. Bu bağlamda, NCA'nın en yaygın kimyasal formülü Eşitlik (2) ile ifade edilmektedir (Basile vd., 2025; Lu vd., 2025; Xia vd., 2024).



NCA hücrelerinin çalışma prensibi, katot malzemesinin lityum iyonlarının oksidasyon (elektron kaybetmesi) ve redüksiyon (elektron kazanması) reaksiyonlarına dayanmaktadır (Stoyanov & Gueorgiev, 2025). Bu süreçte, nikel iyonları ana aktif bileşen olarak görev yapmaktadır. Kobalt ise yapısal kararlılığını sağlamak ve alüminyum ise termal güvenliği artırmaktadır. Bununla birlikte, alüminyum iyonları elektron transfer süreçlerine doğrudan katılmadığından, hücrenin kapasitesini azaltabilmektedir. Bu durum, NCA'nın yüksek enerji yoğunluğu ve yarı hücre potansiyeli gibi avantajlarını ortaya koyarken, dezavantajlarını da vurgulamaktadır (Basile vd., 2025; Julien vd., 2014; Koech vd., 2024). Örneğin, yüksek enerji yoğunluğu ve uzun döngü ömrü (2000 döngüden fazla) sayesinde EV'ler gibi yüksek enerji gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Öte yandan, yüksek maliyet, termal hassasiyet ve kobalt bağımlılığı gibi sorunlar kullanımını kısıtlamaktadır (Koech

vd., 2024). Şekil 2’de, NCA hücresinin katodundaki (Co=0.15) atomik yapı gösterilmiştir (Ghatak vd., 2017).

Şekil 2. NCA hücresinin katodundaki (Co=0.15) atomik yapısı



Kaynak: (Ghatak vd., 2017)

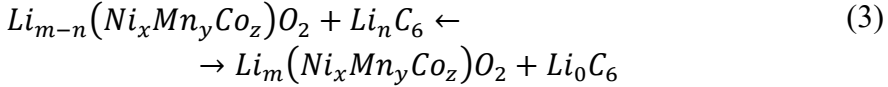
NCA hücrelerinin güvenliği konusunda önemli endişeler bulunmaktadır. Termal kararlılık sıcaklığı yaklaşık 150°C civarında olup, bu değer NMC hücrelerine kıyasla daha düşük bir eşik anlamına gelmektedir (Gustafsson, 2024). Bu dezavantaj, aşırı ısınmayı önlemek için gelişmiş yönetim sistemleri gerektirmektedir. Buna rağmen, NCA teknolojisinde son yıllarda önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Kapasite kaybını azaltmak için yüksek nikel oranlı çeşitlere ve katkılama tekniklerine odaklanılmıştır (Gustafsson, 2024; Julien vd., 2014). Örneğin, Zirkonyum katkılı NCA (Zr-NCA), H2-H3 faz geçişlerini baskılayarak kapasite azalmasını %22.84 oranında iyileştirebilmektedir (Lu vd., 2025). Bu iyileştirme, yüksek gerilim koşullarında performansı artırabilmektedir. Benzer şekilde, Al_2O_3 gibi yüzey kaplamaları, yüksek akım yoğunluklarında hücrenin ömrünü ve performansını artırabilmektedir (Koech vd., 2024).

Sonuç olarak, NCA hücreleri, yüksek enerji yoğunluğu ve uzun ömür gibi özellikleriyle EV pazarında önemli bir paya sahip olsa da güvenlik ve maliyet zorlukları nedeniyle sürekli iyileştirmelere ihtiyaç duymaktadır. Bu bağlamda, katkılama ve kaplama gibi teknikler, NCA'nın gelecekteki uygulamalarını daha sürdürülebilir hale getirmektedir. Ayrıca NCA hücre türü, NMC gibi benzer hücre türleriyle rekabet edebilecek bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Bu açıklamalar, mevcut literatürdeki deneysel çalışmalar ve performans analizlerine dayanmaktadır.

3.3. NMC Hücresi

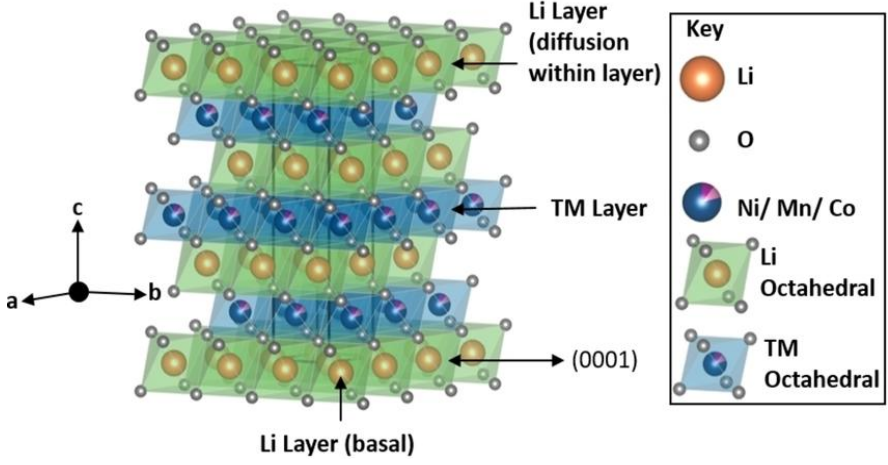
NMC, $LiNiCoMnO_2$ formülüyle temsil edilen bir lityum-iyon batarya (LIB:Lithium-Ion battery) kimyasıdır. Bu batarya türü, katmanlı bir yapıya sahip

olup, geçiş metallerinin (nikel, kobalt ve manganez) oranlarının değiştirilmesi yoluyla performans optimizasyonu sağlanabilmektedir. Temel olarak lityum nikel oksit (LiNiO_2) üzerine inşa edilen NMC hücresi, kapasiteyi ve kararlılığı artırmak için nikel (Ni) ve kobalt (Co) katkılarıyla geliştirilmiş olup, magnezyum (Mn) eklenmesiyle güvenliği sağlamaktadır (Gustafsson, 2024; Talha, 2025). Bu bağlamda, NMC'nin genel hücre tepkime formülü Eşitlik (3) ile ifade edilmektedir (Talha, 2025). Bu bağlamda, NMC malzemeleri geleneksel lityum kobalt oksit (LCO: LiCoO_2) ile karşılaştırıldığında, daha düşük kobalt kullanımı sayesinde ekonomik avantajlar sunmaktadır. Ancak bu hücre yapısı, termal kararlılık ve kapasite kaybı gibi zorluklarla karşılaşmaktadır (Stoyanov & Gueorgiev, 2025; Talha, 2025). NMC ailesinin alt türleri arasında, özellikle NMC811 ($\text{LiNi}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$), yüksek nikel içeriğiyle öne çıkmaktadır (Mehranfar vd., 2024). Yüksek enerji yoğunluğu ve maliyet etkinliği nedeniyle, bu malzeme EV uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Böylece, NMC teknolojisi, sürdürülebilir enerji depolama çözümlerinde önemli bir rol üstlenmektedir (Gao vd., 2025).



NMC811, nikel-zengin bir varyant olarak yaklaşık %80 nikel içermektedir. Bu özellik, yüksek kapasite (190-200 mAh/g) ve enerji yoğunluğu (~800 Wh/kg) sağlamaktadır. Bu hücrenin kristal yapısı rhombohedral (R-3m uzay grubu) olup, Li^+ iyonları octahedral koordinasyon olarak konumlanmaktadır (Gao vd., 2025; Koech vd., 2024). Bu yapı, yüksek gerilim ve hızlı şarj/deşarj yetenekleri sunmaktadır. Bununla birlikte, yüksek nikel içeriği şarj/deşarj süreçleri sırasında geçiş metal iyonlarının oluşumuna yol aarak katmanlı yapının spinel (hızlı şarj/deşarj oluşumu) veya rock-salt (kübik yapı şeklinde bozulma) fazına dönüşmesine neden olmaktadır. Bu durum, kapasite kaybı ve termal kararsızlığa neden olmaktadır. Ayrıca, elektrolit reaksiyonları sonucu oluşan katot-elektrolit ara yüzeyi (cathode electrolyte interphase/CEI) kalınlaşması, iyonik iletkenliği azaltmaktadır. Bu dezavantajlara rağmen, NMC811'in düşük kobalt içeriği (%5.6), kullanım etiği ve maliyet sorunlarını azaltmakta olup, pazar payında %60'ını aşan popülerlik sağlamaktadır (Talha, 2025). şekil 3'de, NMC811 hücresinin katmanlı (rhombohedral) yapısı gösterilmiştir (Wheatcroft vd., 2024).

Şekil 3. NMC811 hücresinin katmanlı yapısı



Kaynak: (Wheatcroft vd., 2024)

NMC ailesinin genel üyeleriyle karşılaştırıldığında, NMC811; NMC532 ($\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{0.3}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$) veya NMC622 ($\text{LiNi}_{0.6}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$) gibi türlerden farklılaşmaktadır (Talha, 2025). Örneğin, NMC532 daha yüksek termal kararlılık sunarken, NMC811'in kapasitesi üstünlük göstermektedir. Bununla birlikte, NMC811'in dezavantajları arasında yüksek sinterleme (yüksek sıcaklıkta parçacıkların birleşerek yoğun, katı bir yapı oluşturmaları) koşulları ve yan reaksiyonlara yatkınlık bulunmaktadır. Bu zorluklar Zr^{4+} katkısı veya Li_2ZrO_3 kaplaması gibi modifikasyonlarla aşılmaktadır. Zr katkısı kation karışımını azaltarak döngü kararlılığını arttırmakta ve 200 döngü sonrası hücrenin kapasitesi %83 oranında olmaktadır. Ayrıca NMC811'in EV başarısı yüksek nikel avantajından gelmektedir. Ancak hücrenin yapısında termal yönetim unsuru kritik önem taşımaktadır (Gao vd., 2025; Mauger & Julien, 2018).

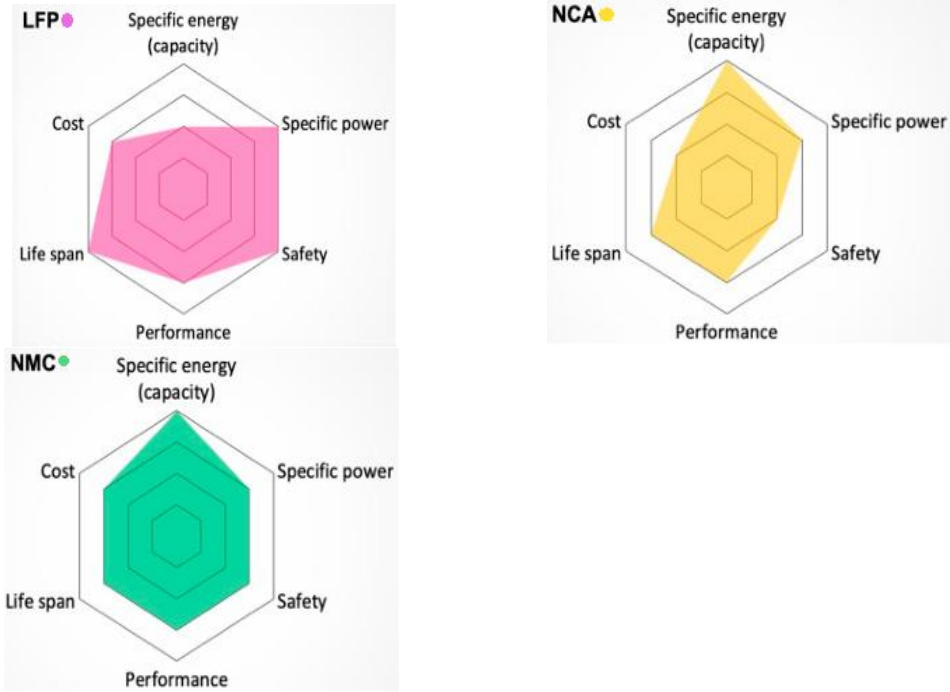
Sonuç olarak, NMC811 hücre türleri LIB teknolojisinde önemli bir rol oynamaktadır. Çünkü bu teknolojiye NMC811 yüksek performansıyla öne çıkmaktadır. Bu performansı değerlendirebilmek amacıyla, bu hücre türlerinde kapasite azalmasının ve termal sorunların çözümüne odaklanmak gelecek araştırmaların konusu olmaya devam edecektir. Bu bağlamda da NMC811'in ticari başarısı malzeme mühendisliği ve elektrokimyasal karakterizasyon çalışmalarıyla sağlanabilecektir. Bu çalışmaların sonucunda, NMC811 sürdürülebilir enerji çözümlerinde kritik bir konum kazanacaktır.

3.4. LFP, NCA ve NCM Hücrelerinin Karşılaştırılması

Elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan lityum-iyon hücreler, özellikle katot malzemelerindeki farklılıklar nedeniyle çeşitli performans özelliklerine sahiptir. Bu bağlamda, en yaygın ve önde gelen katot türleri arasında LFP, NCA ve NMC yer almaktadır (Salgado vd., 2021). Söz konusu hücreler, özgül enerji

(kapasite), özgül güç, güvenlik, performans, kullanım ömrü ve maliyet gibi kritik özellikler açısından kendine özgü avantajlar ve dezavantajlar sergilemektedir (Tekin, 2024). Bununla birlikte, bu hücre türleri elektrikli araçlarda enerji depolama sistemlerinin temelini oluşturmakta olup, farklı kimyasal bileşimlerine bağlı olarak çeşitli performans kriterlerine göre değerlendirilmektedir (R. Chen, 2022). Bu üç hücre türünün Şekil 4’de özgül enerji, özgül güç, güvenlik, performans, ömür ve maliyet başlıkları altında yapılan karşılaştırma, literatürdeki nicel veriler ve niteliksel analizler üzerinden gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, her bir hücrenin avantajları ve dezavantajları, elektrikli araç uygulamaları açısından bütünsel bir perspektifle ele alınmaktadır (Miao vd., 2019; Salgado vd., 2021; Stoyanov & Gueorgiev, 2025).

Şekil 4. LFP, NCA ve NMC performans kriterleri



Kaynak:(Miao vd., 2019)

3.4.1. Özgül Enerji / Kapasite (Specific Energy / Capacity)

Özgül enerji, bir hücrenin birim kütle başına depolayabileceği enerji miktarı olarak tanımlanmakla birlikte, elektrikli araçların menzilini doğrudan etkileyen kritik bir faktördür. LFP hücreleri, olivin yapısı nedeniyle nispeten düşük özgül enerji değerlerine sahiptir. Örneğin, 90-130 Wh/kg aralığında kalmakta ve bu da onları uzun menzil gerektiren uygulamalarda sınırlı kılmaktadır (W. Liu vd., 2022). Buna karşılık, NMC hücreleri daha yüksek özgül enerji sunmaktadır. Yaklaşık 140-190 mAh/g kapasite ile dengeli bir performans sergilemektedir

(Salgado vd., 2021; Talha, 2025). Böylece elektrikli araçlarda enerji yoğunluğu ihtiyaçlarını karşılamaktadır. NCA hücreleri ise en yüksek özgül enerjiye sahip olup, 80-220 mAh/g aralığında değerlerle öne çıkmaktadır (Salgado vd., 2021; Talha, 2025). Ancak bu avantaj diğer kriterlerdeki zayıflıklarla dengelenmektedir. Dolayısıyla, özgül enerji açısından NCA ve NMC hücreleri LFP'ye kıyasla üstünlük gösterirken, LFP'nin güvenliği bu dezavantajı telafi etmektedir (Tekin, 2024).

3.4.2. Özgül Güç (Specific Power)

Özgül güç, hücrenin birim kütle başına sağlayabileceği maksimum güç olarak ifade edilmektedir. Elektrikli araçlarda ivmelenme, yokuş çıkma veya rejeneratif frenleme gibi dinamik operasyonlarda kritik rol oynamaktadır (Tekin, 2024). Bu bağlamda, LFP hücreleri, yüksek özgül güce sahip olmasıyla dikkat çekmektedir (Stoyanov & Gueorgiev, 2025). Bu özellik, hızlı şarj ve yüksek akım deşarjı gerektiren durumlarda avantaj sağlamaktadır (R. Chen, 2022). Benzer şekilde, NMC hücreleri de nikel, mangani ve kobalt dengeli bir şekilde kullanarak yüksek özgül güç değerleri sergilemektedir (Tekin, 2024). Ancak termal kaçak sınırlamaları nedeniyle maksimum performansları kısıtlanmaktadır (Salgado vd., 2021). NCA hücreleri ise yüksek nikel içeriği sayesinde iyi özgül güç sunmaktadır. Buna karşılık NCA hücreleri güvenlik endişeleri nedeniyle tam potansiyelini kullanamamaktadır (Tekin, 2024). Sonuç olarak, özgül güç açısından LFP ve NMC hücreleri NCA'ya göre daha güvenilir seçenekler olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca NCA'nın termal sorunları güç çıkışını kısıtlamaktadır.

3.4.3. Güvenlik (Safety)

Güvenlik, lityum-iyon hücreleri termal kaçak ve aşırı şarj/deşarj riskleri açısından değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, EV'lerde yangın veya patlama gibi olayların önlenmesi hayati önem taşımaktadır (Vergori vd., 2018). LFP hücreleri, olivin kristal yapısı ve kovalent bağları sayesinde en yüksek güvenlik seviyesine sahiptir. Çünkü LFP hücrelerinin termal sıcaklığı yüksek olup, aşırı şarja karşı dayanıklıdır (Salgado vd., 2021; Tekin, 2024). Buna karşılık, NMC hücreleri orta düzeyde güvenlik sunmaktadır. Bu bağlamda, mangani ve kobalt oranlarına bağlı olarak NMC hücrelerinin termal kaçak durumu NCA'dan daha iyi olmakla birlikte, yüksek nikel içerikli varyantlarında oksijen salınımı riski bulunmaktadır (Stoyanov & Gueorgiev, 2025). Öte yandan, NCA hücreleri en düşük güvenlik profiline sahip hücrelerdir. Bu hücrelerin termal kaçak sıcaklığı yaklaşık 170°C civarında olup, faz geçişleri nedeniyle güvenlik önlemleri gerektirmektedir (Tekin, 2024). Böylece, güvenlik açısından LFP hücreleri NMC ve NCA'ya kıyasla açık ara üstünlük göstermekte, bu da onları riskli uygulamalarda tercih edilen bir seçenek haline getirmektedir (Stoyanov & Gueorgiev, 2025).

3.4.4. Performans (Performance)

Performans, hücrenin genel çalışma verimliliği, sıcaklık toleransı ve ekstrem koşullardaki davranışını kapsamaktadır. Elektrikli araçlarda çevre koşulları altında tutarlılık kritik bir rol oynamaktadır. LFP hücreleri, -30°C ila +60°C geniş sıcaklık aralığıyla üstün performans sergilemektedir. Bu özellik, soğuk iklimlerde veya yüksek sıcaklıklarda güvenilirlik sağlamaktadır (Salgado vd., 2021; Tekin, 2024). Buna karşılık, NMC hücreleri dengeli bir performans profili sunmaktadır. Yüksek enerji ve güç yoğunluğuyla birlikte NMC hücrelerinin termal kararlılığı, çeşitli uygulamalarda esneklik sağlamaktadır. Öte yandan, NCA hücreleri yüksek özgül enerji ve güçle öne çıkmaktadır (R. Chen, 2022). Ancak düşük sıcaklıklarda faz geçişleri nedeniyle bu hücrelerin performansı düşmektedir (Tekin, 2024). Bu nedenle, performans açısından LFP'nin geniş sıcaklık toleransı, NMC'nin ve NCA'nın enerji odaklı avantajlarını tamamlamaktadır. NMC'nin dengeli yapısı elektrikli araçların çok yönlü ihtiyaçlarını karşılamaktadır (R. Chen, 2022).

3.4.5. Ömür (Life Span)

Ömür, pilin şarj/deşarj çevrim sayısı ve genel kullanım süresi olarak ölçülmektedir. Elektrikli araçlarda hücrenin uzun vadeli olması maliyet etkinliği açısından önemli bir faktördür (Sanz-Gorrachategui vd., 2024; Stoyanov & Gueorgiev, 2025). Bu bağlamda, LFP hücreleri, 2000'den fazla çevrim ömrüyle öne çıkmaktadır (Gustafsson, 2024; Salgado vd., 2021). Olivin yapısı sayesinde bu hücrede kapasite kaybı minimaldir. Buna karşılık, NMC hücreleri 1000-2000 çevrim aralığında uzun ömür sunmaktadır. Nikel oranına bağlı olarak (örneğin NMC811) performans korunabilirse de yüksek akımlarda bozulma riski vardır. Öte yandan, NCA hücreleri ise yaklaşık 500 çevrim ömrüyle en kısa süreli olup, termal kararlılık azlığı nedeniyle hızlı bozulma olmaktadır (Salgado vd., 2021). Dolayısıyla, ömür açısından LFP hücreleri NMC ve NCA'ya kıyasla belirgin üstünlük taşımaktadır. Bu da onları uzun dönemli yatırımlar için ideal kılmaktadır (Stoyanov & Gueorgiev, 2025).

3.4.6. Maliyet (Cost)

Maliyet, üretim ve hammadde giderlerini kapsamaktadır. EV'lerin yaygınlaşmasında ekonomik sürdürülebilirlik anahtar faktördür (Miao vd., 2019). Bu bağlamda, LFP hücreleri kobalt içermemesi ve demir/fosfor gibi bol bulunan malzemeler sayesinde en düşük maliyetli seçenek olarak öne çıkmaktadır. Bu özellik, büyük ölçekli üretimlerde önemli avantaj sağlamaktadır (Stoyanov & Gueorgiev, 2025). Buna karşılık, NMC hücreleri orta maliyet seviyesinde yer almaktadır. Kobalt oranının düşürülmesiyle (örneğin NMC622) maliyet optimize edilebilse de nikel fiyat dalgalanmaları bu süreci etkilemektedir (Salgado vd., 2021). Öte yandan, NCA hücreleri yüksek kobalt içeriği nedeniyle en pahalı hücredir. Bu nedenle NCA hücrelerinin kullanımı, lüks veya yüksek performanslı

araçlarla sınırlandırılmaktadır. Sonuç olarak, maliyet açısından LFP hücreleri NMC ve NCA'ya göre daha cazip hale gelmektedir (W. Liu vd., 2022).

Sonuç olarak, LFP hücreleri güvenlik, ömür ve maliyet avantajlarıyla uzun vadeli güvenilirlik sunmaktadır. Buna karşılık, NMC hücreleri dengeli performans ve enerji yoğunluğuyla elektrikli araçların genel ihtiyaçlarını karşılamaktadır. Öte yandan, NCA hücreleri yüksek enerji ve güç potansiyeliyle öne çıkmaktadır. Ancak NCA hücreleri, güvenlik ve maliyet dezavantajları nedeniyle özel uygulamalara yöneliktir. Dolayısıyla, bu karşılaştırma elektrikli araç tasarımında hücre seçimi için stratejik karar verme sürecini yönlendirmektedir. Ayrıca, her bir hücrenin güçlü ve zayıf yönlerini vurgulamaktadır.

SONUÇ

Bu çalışmada, EV'ler de kullanılan lityum-iyon batarya hücrelerinin yapısal ve kimyasal özellikleri, mevcut teknolojiler ile gelecek vadeden alternatifler üzerinden kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Hücre yapısı bölümünde, silindirik, kese tipi, prizmatik ve coin hücrelerin avantajları, dezavantajları ve uygulama alanları tartışılmıştır. Enerji yoğunluğu, ısı yönetimi ve güvenlik gibi faktörlerin hücre seçimini nasıl etkilediği vurgulanmıştır. Bu bağlamda, silindirik hücrelerin mekanik dayanıklılığı ve ısı dağılımı, kese tipi hücrelerin esnekliği ve yüksek enerji yoğunluğu, prizmatik hücrelerin kompakt tasarımı, coin hücrelerin ise laboratuvar odaklı sınırlamaları ön plana çıkmaktadır.

EV'lerde kullanılan hücre türleri bölümünde, LFP, NCA ve NMC kimyalarının özgül enerji, özgül güç, güvenlik, performans, ömür ve maliyet açısından karşılaştırılması yapılmıştır. LFP hücrelerinin güvenlik ve uzun ömür avantajları, NMC'nin dengeli performansı ve NCA'nın yüksek enerji potansiyeli gibi özellikler, üreticilerin stratejik kararlarını şekillendiren unsurlar olarak ele alınmıştır. Buna paralel olarak, test aşamasındaki hücre teknolojileri katı hal, sodyum iyon ve alüminyum iyon hücrelerin, sürdürülebilir enerji geçişinde önemli potansiyel taşıdığı tespit edilmiştir. Katı hal hücrelerin yüksek güvenlik ve enerji yoğunluğu, sodyum iyon hücrelerin maliyet etkinliği ve alüminyum iyon hücrelerin bolluk kaynaklı avantajları, geleneksel lityum-iyon teknolojilerini tamamlayıcı niteliktedir. Ancak üretim zorlukları ve performans sınırlamaları nedeniyle bu hücreler, henüz geniş ölçekli ticari entegrasyona ulaşmamıştır.

Sonuç olarak hücre teknolojilerinin EV performansını optimize etme potansiyeli, sürdürülebilirlik ve verimlilik odaklı yeniliklerle artmaktadır. Güvenlik, maliyet ve enerji yoğunluğu arasındaki denge, üreticilerin stratejik kararlarını belirlerken, gelecek araştırmaların malzeme mühendisliği ve üretim süreçlerine odaklanması kritik önem taşımaktadır. Böylece, elektrikli ulaşım ve enerji depolama sektörlerinde daha güvenli, verimli ve çevre dostu çözümlerin geliştirilmesi mümkün olacaktır. Bu bağlamda, hücre teknolojilerinin evrimi, küresel enerji geçişinin anahtar unsurlarından biri olarak konumlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- Baazouzi, S., Feistel, N., Wanner, J., Landwehr, I., Fill, A., & Birke, K. P. (2023). Design, Properties, and Manufacturing of Cylindrical Li-Ion Battery Cells—A Generic Overview. *Batteries*, 9(6), 309. <https://doi.org/10.3390/batteries9060309>
- Basile, V. M., Lai, C.-H., Kim, G. Y., Choi, C. S., Butts, D. M., Thurber, K., King, S. C., & Tolbert, S. H. (2025). Nanostructured $\text{LiNi}_{0.80}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ (NCA) for fast-charging, high-capacity battery cathodes. *Nanoscale Horizons*, 10(11), 3013-3028. <https://doi.org/10.1039/D5NH00290G>
- Chen, R. (2022). *Battery Pack Design of Cylindrical Lithium-Ion Cells and Modelling of Prismatic Lithium-Ion Battery Based on Characterization Tests*, "Master of Applied Science (MAsc) in Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, McMaster University, 2022.
- Chen, Y., Kang, Y., Zhao, Y., Wang, L., Liu, J., Li, Y., Liang, Z., He, X., Li, X., Tavajohi, N., & Li, B. (2021). A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards. *Journal of Energy Chemistry*, 59, 83-99. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.10.017>
- Chen, Z., Danilov, D. L., Eichel, R., & Notten, P. H. L. (2022). Porous Electrode Modeling and its Applications to Li-Ion Batteries. *Advanced Energy Materials*, 12(32), 2201506. <https://doi.org/10.1002/aenm.202201506>
- Gao, Z.-W., Lan, T., Yin, H., & Liu, Y. (2025). Development and Commercial Application of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles: A Review. *Processes*, 13(3), 756. <https://doi.org/10.3390/pr13030756>
- Garole, D. J., Hossain, R., Garole, V. J., Sahajwalla, V., Nerkar, J., & Dubal, D. P. (2020). Recycle, Recover and Repurpose Strategy of Spent Li-ion Batteries and Catalysts: Current Status and Future Opportunities. *ChemSusChem*, 13(12), 3079-3100. <https://doi.org/10.1002/cssc.201903213>
- Ghani, F., An, K., & Lee, D. (2024). A Review on Design Parameters for the Full-Cell Lithium-Ion Batteries. *Batteries*, 10(10), 340. <https://doi.org/10.3390/batteries10100340>
- Ghatak, K., Kumar, H., Nadimpalli, S., & Datta, D. (2017). *Effect of Decreasing Cobalt Content on the Electrochemical Properties and Structural Stability of $\text{Li}_{1-x}\text{Ni}_y\text{Co}_z\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ Type Cathode Materials*. *arXiv preprint arXiv:1704.08413*.
- Gustafsson, J. (2024). *Study for development of a modular battery pack for use in off-highway vehicles at sub zero temperature*. Chalmers University of Technology, Gothenburg, 2024.

- Julien, C., Mauger, A., Zaghib, K., & Groult, H. (2014). Comparative Issues of Cathode Materials for Li-Ion Batteries. *Inorganics*, 2(1), 132-154. <https://doi.org/10.3390/inorganics2010132>
- Kaplan, E. (2025). *Bir Lityum-İyon Batarya Hücresinin Elektriksel Eş Değer Devre Modelinin Kurulması ve Şarj Durumu Tahmini. Yüksek Lisans Tezi, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2025.*
- Koech, A. K., Mwandila, G., Mulolani, F., & Mwaanga, P. (2024). Lithium-ion battery fundamentals and exploration of cathode materials: A review. *South African Journal of Chemical Engineering*, 50, 321-339. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2024.09.008>
- Liu, A., Yao, W., Yang, S., Gonsoulin, D., Larson, A., Condon, A., Attia, P. M., & Shirley-Meng, Y. (2025). Design and Performance of the BYD LFP/Graphite 4680 Cylindrical Cell. *Journal of The Electrochemical Society*, 172(11), 110536. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ae1e33>
- Liu, W., Placke, T., & Chau, K. T. (2022). Overview of batteries and battery management for electric vehicles. *Energy Reports*, 8, 4058-4084. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.03.016>
- Logakannan, K. P., Zhu, F., Sypeck, D., Xu, S., Deng, J., & Kim, S. (2023). Testing and Modeling of Vehicle Li-Ion Battery Module with Prismatic Cells under Abuse Conditions. *Energies*, 16(3), 1055. <https://doi.org/10.3390/en16031055>
- Lu, J., Lu, W., Yuan, J., Li, P., Xu, R., & Wang, Q. (2025). Investigation of Capacity Fading Phenomenon in LiNi_{0.885}Co_{0.1}Al_{0.015}O₂ Cathode Batteries at High-Rate Cycling. *Journal of Materials Engineering and Performance*. <https://doi.org/10.1007/s11665-025-12115-3>
- Madani, S. S., Shabeer, Y., Allard, F., Fowler, M., Ziebert, C., Wang, Z., Panchal, S., Chaoui, H., Mekhilef, S., Dou, S. X., See, K., & Khalilpour, K. (2025). A Comprehensive Review on Lithium-Ion Battery Lifetime Prediction and Aging Mechanism Analysis. *Batteries*, 11(4), 127. <https://doi.org/10.3390/batteries11040127>
- Mauger, A., & Julien, C. M. (2018). Olivine Positive Electrodes for Li-Ion Batteries: Status and Perspectives. *Batteries*, 4(3), 39. <https://doi.org/10.3390/batteries4030039>
- Mehranfar, S., Banagar, I., Moradi, J., Mahmoudzadeh Andwari, A., Könnö, J., Gharehghani, A., Rabiei, M., & Kurvinen, E. (2024). The perspective of energy storage systems advancements and challenges for electric vehicle applications; metric, mechanism, mode, and mitigation framework. *Future Sustainability*, 22-32. <https://doi.org/10.55670/fppl.fusus.2.4.4>

- Miao, Y., Hynan, P., Von Jouanne, A., & Yokochi, A. (2019). Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements. *Energies*, 12(6), 1074. <https://doi.org/10.3390/en12061074>
- Salgado, R. M., Danzi, F., Oliveira, J. E., El-Azab, A., Camanho, P. P., & Braga, M. H. (2021). The Latest Trends in Electric Vehicles Batteries. *Molecules*, 26(11), 3188. <https://doi.org/10.3390/molecules26113188>
- Sanz-Gorrachategui, I., Wang, Y., Guillén-Asensio, A., Bono-Nuez, A., Martín-del-Brío, B., Orlik, P. V., & Pastor-Flores, P. (2024). Remaining Useful Life Estimation of Used Li-Ion Cells With Deep Learning Algorithms Without First Life Information. *IEEE Access*, 12, 147798-147808. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3474089>
- Stoyanov, S., & Gueorgiev, V. (2025). Comparative Analysis of Lithium-Ion Batteries. *2025 19th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/ELMA65795.2025.11083493>
- Talha, N. (2025). *Direct recycling of NMC811-based cathodes for lithium-ion batteries. Master's Programme in Chemical, Biochemical and Materials Engineering. Aalto University, 2025.*
- Tekin, M. (2024). *Farklı Lityum İyon Piller İçin Batarya Şarj Durumu Tahmini. Doktora Tezi Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2025.*
- Vergori, E., Mocera, F., & Somà, A. (2018). Battery Modelling and Simulation Using a Programmable Testing Equipment. *Computers*, 7(2), 20. <https://doi.org/10.3390/computers7020020>
- Waldmann, T., Scurtu, R.-G., Richter, K., & Wohlfahrt-Mehrens, M. (2020). 18650 vs. 21700 Li-ion cells – A direct comparison of electrochemical, thermal, and geometrical properties. *Journal of Power Sources*, 472, 228614. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228614>
- Wheatcroft, L., Bird, A., Gollapally, N., Booth, S. G., Cussen, S. A., & Inkson, B. J. (2024). In Situ Fracture Behavior of Single Crystal LiNi_{0.8} Mn_{0.1} Co_{0.1} O₂ (NMC811). *Batteries & Supercaps*, 7(6), e202400077. <https://doi.org/10.1002/batt.202400077>
- Xia, X., Guo, Y., Zhao, Y., Bai, X., Zhu, J., Yang, W., Wang, Y., Fu, L., & Zhou, L. (2024). Ni-rich LiNi_{0.82}Co_{0.15}Al_{0.03}O₂(NCA) as a high specific capacity thermal battery cathode material. *Ionics*, 30(1), 607-615. <https://doi.org/10.1007/s11581-023-05285-4>
- Yeganehdoust, F., Madikere Raghunatha Reddy, A. K., & Zaghib, K. (2025). Cell Architecture Design for Fast-Charging Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles. *Batteries*, 11(1), 20. <https://doi.org/10.3390/batteries11010020>

BÖLÜM 27

Ekonomizer Kullanımıyla Atık Isı Geri Kazanımının Değerlendirilmesi

Neşe Taşdemir¹ & Mustafa Tahir Akkoyunlu² & Alparslan Turanboy³

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye, ORCID: 0009-0001-2490-1343

² Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye, ORCID:0000-0001-5748-6759

³ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye, ORCID: 0000-0002-9908-5387

GİRİŞ

Enerji, ekonomik gelişme ve refah seviyesinin artmasında önemli bir faktördür. Enerji tüketimi, yaşam standardındaki iyileşme ve büyük şehirlere göçün, nüfusun ve şehirleşmenin artmasına bağlı olarak hızlı bir şekilde artmaktadır (Rosti et al., 2020). Artan enerji talebi ve çevre bilinci bütün dünya üzerinde enerji kaynaklarını daha verimli bir şekilde kullanmayı zorunlu kılmaktadır. Bu yüzden fosil yakıtlı güç ve ısıtma sistemlerinin tasarım aşamasında ana amaç enerji tasarruflarının maksimize edilip enerji tüketiminin minimize edilmesidir (Kayfeci, 2014).

Günümüzde sanayi sektöründe enerji yönetimi, yalnızca maliyetlerin kontrol altında tutulması için değil; aynı zamanda sürdürülebilir üretim anlayışının desteklenmesi ve enerji arz güvenliğinin güçlendirilmesi açısından da önem taşımaktadır. Enerji ihtiyacının büyük bölümünü dış kaynaklarla karşılayan Türkiye gibi ülkelerde, işletmelerin hayata geçireceği verimlilik uygulamaları hem giderleri azaltmakta hem de dışa bağımlılıktan doğan riskleri sınırlamaktadır. Bu çerçevede, mevcut sistemlerde ortaya çıkan kayıpların analiz edilmesi ve bu kayıpları geri kazanacak teknolojilerin kullanılması, endüstrideki enerji dönüşümünün temel adımlarından biri olarak değerlendirilmektedir.

Dünyada olduğu gibi ülkemizde de nüfusun hızlı artışı ve sanayideki gelişmeler ile doğru orantılı olarak enerji ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Türkiye için artan enerji talebi ve ithalat miktarı yerli kaynakların önemini daha da artırmaktadır (Akkoyunlu, n.d.). Var olan enerji kaynakları artan enerji ihtiyaçlarını karşılayamamış ve bunun sonucunda enerji verimliliği kavramı ortaya çıkmıştır. Üretimden elde edilen ürün miktarını ve kalite oranını düşürmeden harcanan enerji miktarının ekonomik gelişmeleri ve sosyal refahı olumsuz etkilemeyecek şekilde en aza indirilmesi enerji verimliliği olarak isimlendirilmektedir (Tokgöz & Özgün, 2019).

Sanayi tesislerinde buhar üretimi için kullanılan kazanlar, yüksek düzeyde enerji tüketmeleri sebebiyle öne çıkan ekipmanlar arasında yer almaktadır. Bu kazanlarda verimliliği düşüren başlıca etkenlerden biri, yanma sonucu oluşan ve baca gazı ile atmosfere atılan yüksek sıcaklıktaki ısının kaybıdır. Çoğu durumda doğrudan çevreye salınan bu enerji, uygun mühendislik uygulamalarıyla geri kazanıldığında hem ekonomik avantaj sağlayabilmekte hem de çevresel açıdan olumlu sonuçlar yaratmaktadır. Bu doğrultuda özellikle dikkat çeken teknolojilerden biri ekonomizer sistemleridir.

Ekonomizer baca gazlarının atık ısısından yararlanarak, buhar kazanları, kızgın yağ kazanları, sıcak ve kızgın su kazanlarında sistem geri dönüş akışkanının ısıtılmasında kullanılarak yakıt tasarrufu sağlayan ve kazan verimliliğini arttıran sistemlerdir. Ekonomizerlerde baca gazı sıcaklığının işletme şartlarına düşürülmesi halinde verimliliğinin %5 ile %10 arasında verim artması mümkündür (Koneko Enerji, 2025).

Bu çalışmada, endüstriyel ölçekte bir kazana ekonomizer entegrasyonunun uygulanabilirliği ele alınmış; geri kazanılabilecek enerji miktarı teknik hesaplamalarla belirlenmiş ve farklı kullanım senaryoları üzerinden ekonomik analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında yatırımın geri ödeme süresi, yıllık yakıt tüketimindeki azalma ve sera gazı emisyonlarındaki düşüş gibi çıktılar değerlendirilmiştir. Ayrıca sistem performansını etkileyen temel parametreler tartışılmış ve uygulamanın sanayi tesislerine adapte edilmesi durumunda ortaya çıkabilecek toplam tasarruf potansiyeli ortaya konmuştur. Böylelikle yalnızca kuramsal değil, aynı zamanda pratikte uygulanabilir bir enerji verimliliği yaklaşımının örneği sunulmuştur.

1. SANAYİ TESİSLERİNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE UYGULANABİLİR FIRSATLAR

1.1. Kazandaki Atık Isı Enerjisinin Değerlendirilmesi

Enerji verimliliği, belirli bir hedefe ulaşmak veya istenen bir görevi tamamlamak için enerjinin optimum şekilde kullanılması anlamına gelir (Omar Banaez & Akkoyunlu, 2023). Ekonomizer ile Atık Isı Geri Kazanım Çözümü kapsamında yapılan incelemede, tesisin buhar/sıcak su kazanında yanma sonucu oluşan baca gazı sıcaklığının yaklaşık 185 °C'den 130 °C'ye düşürülebileceği öngörülmüştür. Bu sıcaklık aralığında sistemden yaklaşık 36,9 kW seviyesinde geri kazanılabilir ısı potansiyeli bulunmaktadır. Ekonomizerin verimli işletilmesiyle su tarafına net aktarılabilen güç yaklaşık 33,21 kW olup, bu değer yıllık çalışma süresi dikkate alındığında 161.823,76 kWh/yıl enerji tasarrufuna karşılık gelmektedir. Bu tasarruf miktarı 15.209 Sm³/yıl doğalgaz azaltımı, 12,5 TEP/yıl enerji tasarrufu ve 27,47 ton CO₂/yıl emisyon azaltımı sağlamaktadır. Mevcut doğalgaz birim fiyatları üzerinden yıllık parasal karşılığı yaklaşık 292.770,56 TL/yıl olarak hesaplanmıştır. Yaklaşık 15.000 € (727.970 TL) tutarındaki yatırım bedeli dikkate alındığında, sistemin 2,49 yıl gibi kısa bir sürede geri dönüş sağlayacağı hesaplanmıştır.

Uygulama yaklaşımı:

Ekonomizer sistemi, baca çıkışına yerleştirilen plakalı ya da kanatlı borulu bir ısı değiştiricisi, kondens tahliye hattı ve yoğunlaşma riskine karşı korozyona dayanıklı malzeme tercihindendir oluşmaktadır. Ana kullanım amacı, kazana beslenen suyun veya proses suyunun önceden ısıtılmasıdır. Yük değişimlerinde baca çekişini ve kazan güvenliğini sağlamak için by-pass hattı ve üç yollu vana kullanılır. Kondens oluşmasının beklendiği çalışma koşullarında paslanmaz çelik ya da uygun alaşım malzemeler tercih edilmeli, oluşan asidik kondensin nötralizasyonu için gerekli önlemler alınmalıdır.

İşletme ve doğrulama:

Sistemin devreye alınmasında baca gazı sıcaklığı, su giriş-çıkış sıcaklıkları ve debiler çevrim içi izlenmeli; sezonluk performans, IPMVP Option B yaklaşımıyla

(ölçüme dayalı) doğrulanmalıdır. Periyodik temizlik, kurum/kir tabakasının ısı geçişine olumsuz etkisini sınırlayacak şekilde planlanmalı; donma ve korozyon riskleri için bakım talimatı oluşturulmalıdır.

Beklenen etkiler:

Uygulama, yakıt tüketimini ve buna bağlı CO₂ emisyonlarını anlamlı ölçüde düşürür; kazan yükünü azaltarak ekipman ömrünü destekler ve ısı konfor/proses kararlılığını iyileştirir. Sunulan sonuçlar, sahadan elde edilen ölçümler ve tabloda verilen işletme parametreleriyle uyumludur.

1.1.1. Ekonomizer ile Isı Geri Kazanım Yöntemleri

Sanayi kazanlarında verimliliği sınırlayan en büyük kayıplardan biri, yanma sonrası ortaya çıkan ve yüksek sıcaklıkta atmosfere bırakılan baca gazlarıdır. Bu kayıpların önlenmesinde en etkili çözümlerden biri, baca hattına yerleştirilen ekonomizer sistemleridir. Bu sistemler, baca gazında bulunan ısının tekrar kazan devresine aktarılmasını sağlayarak yakıt tüketimini azaltır ve kazan verimliliğini yükseltir.

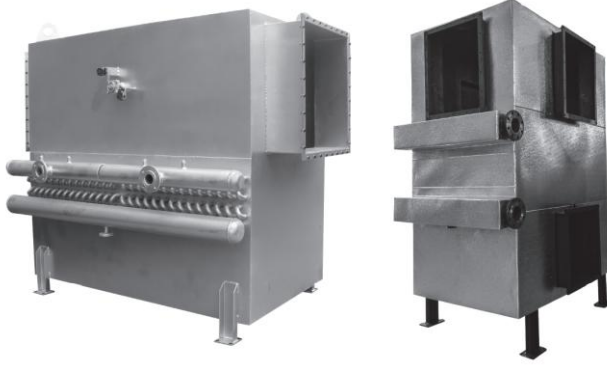
Uygulamada öne çıkan iki temel yaklaşım bulunmaktadır:

1. Besi Suyu Ön Isıtması: Ekonomizerlerin en yaygın kullanım alanı, kazana gönderilecek besleme suyunun baca gazı ile önceden ısıtılmasıdır. Böylece düşük sıcaklıktaki su, baca gazından aldığı enerji ile daha yüksek sıcaklıklara ulaşır. Bu durum, aynı miktarda buhar üretmek için harcanacak yakıtın azalmasını sağlar ve doğrudan enerji tasarrufu oluşturur.

2. Yanma Havaı Ön Isıtması: Bazı kazan tasarımlarında ekonomizerden elde edilen enerji, yanma havasının ısıtılmasında kullanılır. Daha sıcak yanma havaı, yanma verimini artırır, baca gazı kayıplarını düşürür ve sistemin genel performansını geliştirir.

Besi Suyu ile Isı Transferi

Endüstriyel kazanlarda baca gazı sıcaklıkları genellikle oldukça yüksektir ve bu da önemli bir ısı geri kazanım fırsatı sunar. Ekonomizerler, bu yüksek sıcaklıktaki gazların enerjisini ısı değiştirici yüzeyler aracılığıyla kazana giren soğuk besi suyuna aktarır. Sonuç olarak, suyun kazana giriş sıcaklığı yükselir ve aynı buhar miktarını üretmek için daha az yakıt tüketilmiş olur.



Şekil 1. Örnek Ekonomizer Dış Görünüşü Görseli (Beta Kazan, 2025)

1.1.2. Ekonomizer Kullanım Alanları

Ekonomizerler çok çeşitli alanlarda uygulanabilmektedir. Önemli olan sistemden elde edilen geri kazanılmış ısının, sistemin çalışma süresi boyunca kullanılıyor olmasıdır. İşletmelerde ekonomizer kullanımı ile elde edilebilecek faydalar şu şekilde sıralanmaktadır;

- Yakıt cinsine ve kazandan çıkan duman gazı sıcaklığına bağlı olarak kazan veya tesis veriminde %3 ile %8 arasında artış sağlanabilmektedir.
- Verim artışına bağlı, aynı miktarda yakıt harcanarak daha fazla ısı üretimi sağlanabilir veya aynı kapasite için daha az yakıt harcanabilmektedir.
- Kullanılan yakıt miktarının aza indirilmesi ile birlikte çevreye duyarlı sistemler oluşturulabilmektedir.
- Kazandaki besleme suyuna, geri kazanılan ısının verilmesi ile birlikte, kazan veriminin farklı yük durumlarında göreceli olarak yüksek seviyelerde sabit kalması ve kazanın farklı ve değişken yüklerde uyum yeteneğinin artması sağlanmaktadır.
- Ekonomizerin ihtiyaç duyulan sisteme dâhil edilmesi ile birlikte, kazanın sahip olduğu kapasite ve verim istenilen ideal düzeylere çıkarılabilir.
- Tesisin devamlı çalıştığı durumlarda, ekonomizer sistemin kurulması ile birlikte yatırımın 5 ile 20 ay arasında proje masrafını karşılayabildiği görülmüştür.

Amorti süresi ekonomizerin tipine göre değişkenlik gösterebilmektedir (Uysal, 2019, s. 24).

Sanayi tesislerinde kazanlardan baca gazı yoluyla dışarıya atılan ısı, yalnızca kayıp bir yan ürün olarak değil, işletme için alternatif ve sürekli bir enerji kaynağı olarak değerlendirilmelidir. Ekonomizer sistemleri sayesinde geri kazanılan bu enerji; üretim süreçlerinde, yardımcı ekipmanlarda ve sosyal alanlarda kullanılabilirdiği gibi, işletmenin enerji giderlerini azaltan ve çevresel performansını iyileştiren önemli bir unsur olarak öne çıkar.

1. Besi Suyu Ön Isıtması

Ekonomizerlerin en yaygın uygulaması, kazanlara giren soğuk besleme suyunun önceden ısıtılmasıdır. Düşük sıcaklıkta kazana giren su, baca gazından aktarılan enerji ile önceden 80–90 °C seviyelerine kadar çıkarılır. Bu sayede buhar üretimi için harcanan yakıt miktarı azalır, kazan verimliliği artar ve yakıt tüketiminde %5–10’a varan tasarruf sağlanır. Bu yöntem, sanayi ölçeğinde yıllık binlerce Sm³ doğalgaz tasarrufu anlamına gelebilir.

2. Yanma Havası Ön Isıtması

Besi suyu dışında, geri kazanılan ısı yanma havasının da ön ısıtılmasında kullanılabilir. Yanma havasının daha sıcak olarak kazana girmesi, yanma kalitesini iyileştirir, alev sıcaklığını dengeler ve emisyonları azaltır. Bu uygulama sayesinde daha homojen bir yanma gerçekleşir ve hem enerji verimliliği hem de çevresel performans artar.

3. Proses Isıtması

Birçok endüstride farklı sıcaklık seviyelerinde su veya akışkan kullanımı gerekmektedir. Tekstil sektöründe boyama ve yıkama, gıda sektöründe pastörizasyon ve temizlik, kimya sektöründe reaksiyon öncesi ısıtma gibi işlemler geri kazanılan ısı ile karşılanabilir. Böylece doğrudan üretim maliyetleri düşerken, proses sürekliliği ve güvenilirliği de artırılmış olur.

4. Mekânsal Isıtma ve İklimlendirme

Sanayi tesislerinde üretim alanları, depolar ve idari binalar yılın büyük bölümünde ısıtma ihtiyacı duymaktadır. Geri kazanılan ısı, merkezi ısıtma sistemlerine entegre edilerek bu ihtiyacın önemli bir bölümü karşılanabilir. Özellikle kış aylarında, normalde yakıtla sağlanacak olan ısıtma yükünün büyük kısmı bedelsiz enerji ile karşılanarak işletmenin enerji giderleri düşürülebilir.

5. Sosyal Alanlarda Sıcak Su Kullanımı

Çalışanların duş, lavabo ve yemekhane ihtiyaçları için gerekli olan sıcak su, geri kazanılan enerji ile üretilebilir. Bu uygulama, çalışan konforunu sağlarken aynı zamanda işletmenin doğalgaz veya elektrik tüketimini azaltır. Özellikle

vardiyalı sistemle çalışan tesislerde, sosyal alanlarda sıcak su tüketimi ciddi bir yük oluşturduğundan geri kazanım sistemleri yüksek tasarruf potansiyeli yaratır.

6. Yardımcı Sistemlerde Kullanım

Geri kazanılan ısı, boyler, sıcak su depolama tankları veya diğer ısı değiştirici ekipmanlara entegre edilerek farklı noktalarda kullanılabilir. Bu esneklik, işletmelere kendi enerji yönetim stratejilerine uygun çözümler geliştirme imkânı tanır.

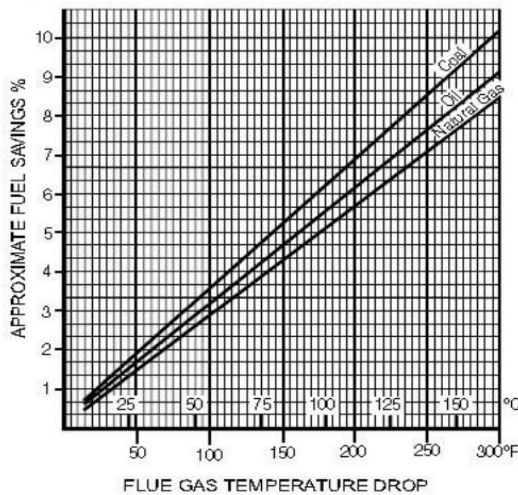
1.1.3. Kazandaki Ekonomizer Sisteminin Teknik Özellikleri ve Saha Yerleşimi

Ekonomizer tanım olarak; herhangi bir ısı kazanının duman gazı sıcaklığını düşürerek düşük sıcaklıktaki bu ısıyı geri kazanan ve yakıttan ekstra tasarruf sağlayan ısı değiştiricisi anlamına gelmektedir. Sıcak su kazanı ve kızgın yağ kazanı gibi birçok diğer kazan tipinde de kullanılmakla birlikte, asıl yaygın olduğu alan buhar kazanlarıdır.

Günümüzde özellikle büyük kapasiteli buhar kazanlarının vazgeçilmez ünitelerindendir. Hava fazlalık katsayısı ve yakıt türüne göre değişmekle birlikte, duman gazı sıcaklığındaki yaklaşık 21 °C düşüş toplam kazan veriminde ortalama 1% artış anlamına gelmektedir (Mobley, 1991).

Bu değer aynı zamanda yakıt sarfiyatındaki azalmayı gösterir. Hava fazlalık katsayısının yüksek olduğu kojenerasyon uygulamalarında (özellikle gaz türbini uygulamaları) oluşan duman gazı debisi daha fazla olduğu için %1'lik verim artışı için gereken sıcaklık düşümü değeri daha azdır.

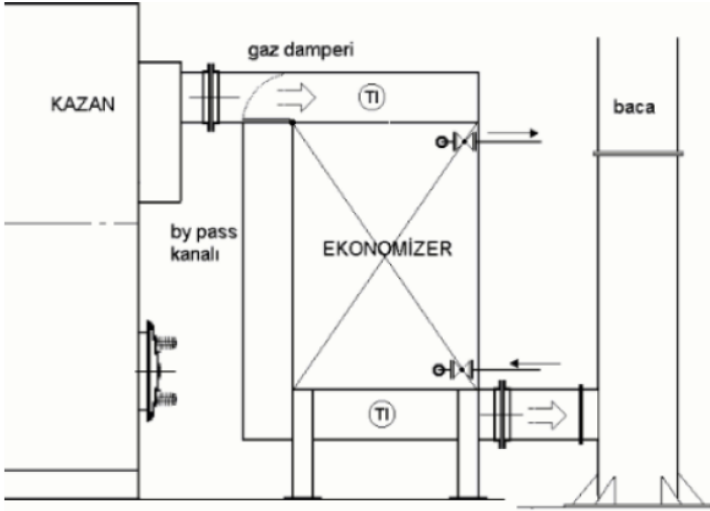
Kazan uygulamaları için normal hava fazlalık katsayılarına ve yakıt türlerine göre yaklaşık tasarruf miktarları Şekil 2'de görülebilir.



Şekil 2. Bacagazı Sıcaklığındaki Azalmaya Bağlı Olarak Kazandaki Verim Artışı (Mobley, 1991)

Ekonomizerler, kazan çıkışına yakın bölgeye entegre edilerek baca hattına bağlanır. Bu konumlandırma, yüksek sıcaklıktaki gazların doğrudan ısı değiştirici yüzeyle temas etmesini sağlayarak verimliliği artırır. Saha yerleşiminde ise ekipman çevresinde bakım ve temizlik için yeterli alan bırakılması, borulama hatlarının kısa ve kayıpsız olacak şekilde düzenlenmesi önem taşır.

Optimizasyon, hemen her alanda kullanılan bir kavram olup, kazancı maksimum ve maliyeti minimum yapmayı amaçlamaktadır (Akkoyunlu & Engin, n.d.). Sistemin güvenli ve verimli çalışabilmesi için ekonomizer ile birlikte sirkülasyon pompaları, sıcaklık ve basınç sensörleri, by-pass hatları ve otomasyon kontrol üniteleri kullanılmaktadır. Bu yardımcı bileşenler, değişken yük koşullarında sistemin stabil çalışmasını sağlar. Ayrıca, yüksek sıcaklık farklarının yarattığı genleşmelere karşı uygun genleşme ekipmanları ve emniyet elemanları da sahada yer almalıdır.



Şekil 3. Tipik Bir Ekonomizer Uygulaması Yerleşim Şeması (Uysal, 2019, s. 22)



Resim 1. Kazan Genel Görself

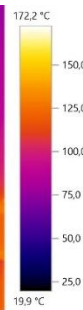
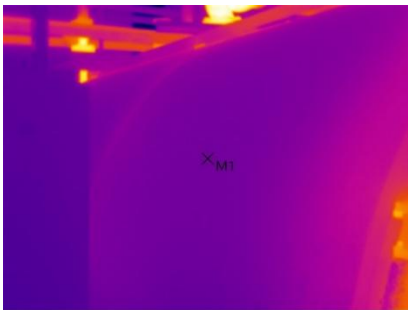
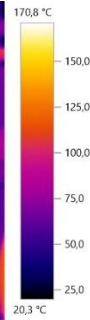
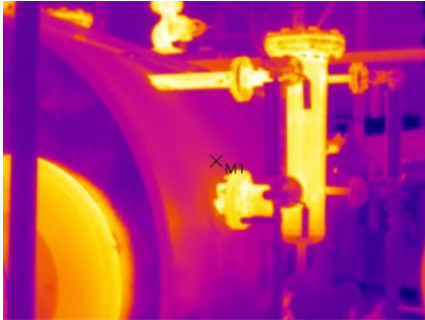
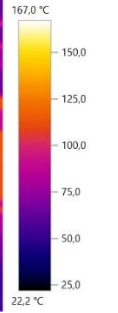
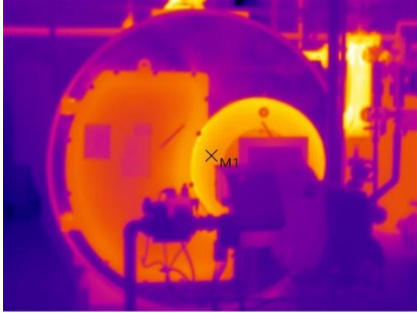
Tablo 1. İncelenen Kazana Ait Teknik Özellikler

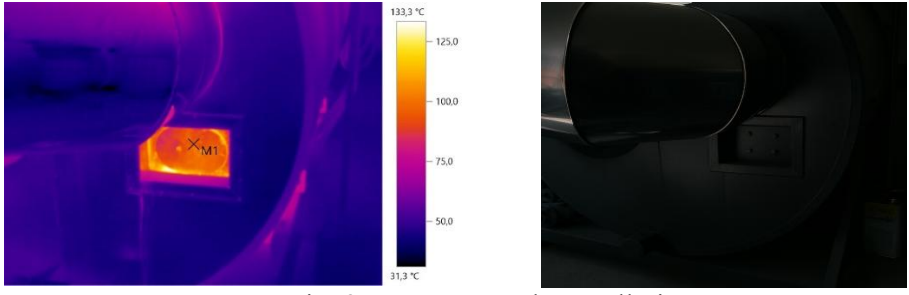
Parametre	Değer	Birim / Açıklama
Ürün / Product	Gaz / Sıvı Yakıtlı Buhar Kazanı	Gas / Liquid Fuel Fired Steam Boiler
Üretim Tarihi / Production Date	27.10.2016	
İşletme Basıncı / Operating Pressure	10	bar
İzin Verilen Maksimum Çalışma Basıncı / Maximum Allowable Pressure	10	bar
Kapasite / Capacity	2.000	kg/h
Maksimum Isı Gücü / Maximum Heat Output	1.309	kW
Verim / Efficiency	92	%
Hidrolik Test Basıncı / Hydrostatic Test Pressure	15	bar
Hidrolik Test Tarihi / Hydrostatic Test Date	26.10.2016	
Kazanın Ağırlığı / Boiler Weight	2.350	kg
Standart / Standard	TS EN 12953-1,2,3	
Onay / Approval	CE 0408, TSE	

1.1.4. Kazan Baca Gazı Ölçümleri

Tablo 2. Baca Gazı Ölçüm Sonuçları

Parametre	Değer	Birim
O ₂	5,74	%
λ (Lambda)	1.44	-
CO ₂	8.53	%
CO	0	ppm
Baca Gazı Sıcaklığı (Tb)	185,1	°C
Ortam Sıcaklığı (To)	32,3	°C





Resim 2. Kazan Termal Görselleri

1.1.5. Kazan Verim Hesabı

Tablo 3. İncelenen Kazana Ait Kazan Verim Hesabı

Kategori	Alan	Parametre	Değer	Birim
Ölçüm Girdileri		O ₂ (hacimce)	5,74	%
Ölçüm Girdileri		CO	0	ppm
Ölçüm Girdileri		Baca Gazı Sıcaklığı (T _g)	185,1	°C
Ölçüm Girdileri		Ortam Sıcaklığı (T _o)	32,3	°C
Yakıt ve Isıl Değerler		Yakıt	Doğal Gaz	-
Yakıt ve Isıl Değerler		Doğal Gaz Tüketimi	168	Nm ³ /h
Yakıt ve Isıl Değerler		Üst Isıl Değer (HHV)	13459,13	kcal/N m ³
Yakıt ve Isıl Değerler		Alt Isıl Değer (LHV)	12132,35	kcal/N m ³
Yakıt ve Isıl Değerler		Yakıt tarafından verilen ısı (LHV)	1386000	kcal/h
Yakıt ve Isıl Değerler		Yakıt tarafından verilen ısı (HHV)	2261133,84	kcal/h
Baca Gazı Türevleri		Teorik CO ₂ (CO ₂) max	11,74	%
Baca Gazı Türevleri		Fiili CO ₂ (CO ₂)me	8,53	%
Baca Gazı Türevleri		K katsayısı (kuru gaz) K	0,311	-
Yüzey Kaybı Detay1	Ön Yüzey	Alan	2,6	m ²
Yüzey Kaybı Detay1	Ön Yüzey	Yüzey Sıcaklığı	55	°C
Yüzey Kaybı Detay1	Ön Yüzey	Ortam Sıcaklığı	32,3	°C
Yüzey Kaybı Detay1	Ön Yüzey	Emissivite (E)	0,95	-

Yüzey Kaybı Detayı	Ön Yüzey	Konveksiyon Kats. (B)	1,45	-
Yüzey Kaybı Detayı	Ön Yüzey	Ur	6,85	W/m ²
Yüzey Kaybı Detayı	Ön Yüzey	Uc	3,165	W/m ² ·K
Yüzey Kaybı Detayı	Ön Yüzey	(Ur+Uc)·A·ΔT	591080	W
Yüzey Kaybı Detayı	Sol Yan Yüzey	Alan	19,95	m ²
Yüzey Kaybı Detayı	Sol Yan Yüzey	Yüzey Sıcaklığı	50	°C
Yüzey Kaybı Detayı	Sol Yan Yüzey	Ortam Sıcaklığı	32,3	°C
Yüzey Kaybı Detayı	Sol Yan Yüzey	Emissivite (E)	0,95	-
Yüzey Kaybı Detayı	Sol Yan Yüzey	Konveksiyon Kats. (B)	1,45	-
Yüzey Kaybı Detayı	Sol Yan Yüzey	Ur	6,835	W/m ²
Yüzey Kaybı Detayı	Sol Yan Yüzey	Uc	2,974	W/m ² ·K
Yüzey Kaybı Detayı	Sol Yan Yüzey	(Ur+Uc)·A·ΔT	3410901	W
Yüzey Kaybı Detayı	Sağ Yan Yüzey	Alan	19,95	m ²
Yüzey Kaybı Detayı	Sağ Yan Yüzey	Yüzey Sıcaklığı	68	°C
Yüzey Kaybı Detayı	Sağ Yan Yüzey	Ortam Sıcaklığı	32,3	°C
Yüzey Kaybı Detayı	Sağ Yan Yüzey	Emissivite (E)	0,95	-
Yüzey Kaybı Detayı	Sağ Yan Yüzey	Konveksiyon Kats. (B)	1,45	-
Yüzey Kaybı Detayı	Sağ Yan Yüzey	Ur	10,425	W/m ²
Yüzey Kaybı Detayı	Sağ Yan Yüzey	Uc	3,544	W/m ² ·K
Yüzey Kaybı Detayı	Sağ Yan Yüzey	(Ur+Uc)·A·ΔT	7718467	W
Yüzey Kaybı Detayı	Arka Yüzey	Alan	6,2	m ²
Yüzey Kaybı Detayı	Arka Yüzey	Yüzey Sıcaklığı	48	°C
Yüzey Kaybı Detayı	Arka Yüzey	Ortam Sıcaklığı	32,3	°C
Yüzey Kaybı Detayı	Arka Yüzey	Emissivite (E)	0,95	-
Yüzey Kaybı Detayı	Arka Yüzey	Konveksiyon Kats. (B)	1,45	-

Yüzey Kaybı Detayı	Arka Yüzey	Ur	6,821	W/m ²
Yüzey Kaybı Detayı	Arka Yüzey	Uc	2,888	W/m ² ·K
Yüzey Kaybı Detayı	Arka Yüzey	(Ur+Uc)·A·ΔT	388072	W
Yüzey Kaybı Detayı	Tüm Yüzeyler	TOPLAM (Ur+Uc)·A·ΔT	0	W
Isı Kayıpları		Kuru Baca Gazı Kaybı (Lkgb)	6,18	%
Isı Kayıpları		Nem Nedeniyle Isı Kaybı (Lnbq)	2,01	%
Isı Kayıpları		CO Nedeniyle Isı Kaybı (Lco)	0	%
Isı Kayıpları		Yüzey Kaybı (Lrek)	0,76	%
Isı Kayıpları		Toplam Isı Kaybı (L)	8,95	%
Özet		Kazan Verimi	91,05	%

Kazanlarda ekonomizer kullanılarak baca gazı atık ısının geri kazanımı ile enerji tasarrufu sağlanacaktır. Aşağıda bu projeye ait özet bilgilerin yer aldığı tablo sunulmuştur.

Tablo 4. Ekonomizer ile Isı Geri Kazanım Hesaplamaları

Ortalama Baca Gazı Sıcaklığı	185,10	°C
Ortalama Baca Gazı Hızı	4,95	m/s
Baca İç Çapı	0,45	m
Baca Kesit Alanı	0,16	m ²
Baca Gazı Hacimsel Debisi	0,79	m ³ /s
Baca Gazı Özgül Kütlesi	0,78	kg/m ³
Baca Gazı Kütlesel Debi	0,61	kg/s
Baca Gazı Özgül Isı	0,26	kcal/kg°C
Uygulama Sonrası Ön Görülen Baca Gazı Sıcaklığı	130,00	°C
Uygulama Sonrası Ön Görülen Baca Gazı Sıcaklık Farkı	55,10	°C
Geri Kazanılabilir Isı Miktarı	8,82	kcal/s
Geri Kazanılabilir Isı Miktarı	36,90	kW
Ekonomizer Verimi	90,00	%
Suya Aktarılabilecek Net Enerji	33,21	kW
Kazan Sistemi Verimi	91,05	%
Doğalgaz Tasarrufu	40,53	kW
Yıllık Çalışma Saati	3.600,00	h
Yıllık Doğalgaz Tasarrufu	145.898,96	kWh
Yıllık Doğalgaz Tasarrufu	15.208,86	Sm ³

Doğalgaz Birim Maliyeti	19,2500	TL/Sm ³
Yıllık Doğalgaz Tasarrufu	292.770,59	TL/Yıl
Yatırım Bedeli	48,531	Euro
	15.000,00	TL/Euro
	727.969,50	TL
Basit Geri Ödeme Süresi	2,49	Yıl

Tablo 5. Isı Geri Kazanımı Özet Tablosu

Enerji Verimliliği Önlemi	Enerji Türü	Tasarruf Miktarı				CO ₂ Azalma Miktarı	Yatırım Maliyeti	Basit Geri Ödeme Süresi	Uygulama Planı	Net Bugünkü Değer	İç Karlılık Oranı	Ekonomik Ömrü
		Miktar	Birim	TEP/Yıl	TL/Yıl	TonCO ₂ /Yıl	TL	Yıl	Vade	TL	%	Yıl
Ekonomi zer ile Atık Isı Geri Kazanım Çözümü	Doğalgaz	15.209	Sm ³	12,5	₺ 292.770,56	27,47	₺ 727.970	2,49	Orta Vade	1.141.472,5	78,5	10

Ayrıca ekonomik ömür 10 yıl ve iskonto oranı %45 kabul edilerek yatırımın net bugünkü değeri ve iç karlılık oranı hesaplanmıştır. Aşağıdaki tabloda bu değerler bilginize sunulmuştur.

Tablo 6. Ekonomizer Finansal Analiz Tablosu

Ekonimizler ile Atık Isı Geri Kazanım Çözümü

Yıl	Tasarruf	Kümülatif		Yıllık Tasarruf TL	Yatırım Maliyeti TL	İskonto Oranı %
1	£ 292.770,56	£ 435.198,95		£ 292.770,56	£ 727.969,50	45,0%
2	£ 417.198,04	£ 18.000,90				
3	£ 594.507,21	£ 576.506,30				
4	£ 847.172,77	£ 1.423.679,08				
5	£ 1.207.221,20	£ 2.630.900,28				
6	£ 1.720.290,21	£ 4.351.190,49				
7	£ 2.451.413,55	£ 6.802.604,03				
8	£ 3.493.264,31	£ 10.295.868,34				
9	£ 4.977.901,64	£ 15.273.769,98				
10	£ 7.093.509,83	£ 22.367.279,81				

NBD
£ 1.141.472,54

GÖS
2,49

İKO
78,5%

1.2. Kazanlarda Ekonomizer Uygulamaları ve Isı Geri Kazanım Potansiyeli

Sanayi tesislerinin büyük bir kısmı, yüksek enerji tüketimine sahip kazan sistemleri ile donatılmış olup, özellikle baca gazı kayıpları önemli bir enerji verimsizliği kaynağı olarak öne çıkmaktadır.

Sahadan elde edilen gözlemler ve sektörel veriler doğrultusunda, birçok işletmede baca gazı sıcaklıklarının yüksek olduğu ve bu durumun ekonomizer entegrasyonu ile geri kazanıma uygun bir düzeyde bulunduğu tespit edilmektedir. Yapılan değerlendirmelere göre, ekonomizer uygulamaları ile ciddi miktarda atık ısı geri kazanımı sağlanabilmekte, bu sayede hem işletmelerin enerji maliyetleri düşmekte hem de karbon salımları kayda değer ölçüde azaltılabilmektedir.

Bu kapsamda değerlendirildiğinde, ekonomizer ile atık ısı geri kazanımı uygulamalarının sanayi ölçeğinde yaygınlaştırılması, binlerce ton karbon salımının önlenmesine ve milyonlarca lira enerji maliyeti tasarrufuna katkı sağlayabileceği hesaplanmıştır. Enerji verimliliği ve sürdürülebilir üretim hedefleri doğrultusunda, bu tür uygulamaların stratejik yaygınlaştırma potansiyeli oldukça yüksektir.

Doğalgaz Tasarrufu: 15.209 Sm³

CO₂ emisyonu hesaplamalarında IPCC tarafından önerilen Tier yaklaşımları kullanılmaktadır (IPCC, 2006). Bu çalışmada karbon ayak izi hesaplamaları için ilk olarak IPCC (IPCC, 2006) kılavuzunda yer alan Tier-1 yaklaşımının

hesaplama metodolojisi ve emisyon faktörleri seçimi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 7. Doğalgaz Net Kalorifik Değeri (IPCC, 2006)

Yakıt Türü	Dönüşüm Faktörü (TJ/Gg)
Doğal Gaz	48

Tablo 8. Doğalgaz Emisyon Faktörü (IPCC, 2006)

Yakıt Türü	CO ₂ (kg/TJ)	CH ₄ (kg/TJ)	N ₂ O (kg/TJ)
Doğal Gaz	56100	1	0,1

Tablo 9. Tasarruf Potansiyeli Tablosu

Kazan (Adet)	Tasarruf (TEP)	Tasarruf (Ton CO ₂ eşdeğer)
1	12,5	27,47

SONUÇ

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen incelemeler, kazan sisteminde oluşan yüksek sıcaklıklı baca gazlarının önemli bir atık ısı potansiyeli taşıdığını ve ekonomizer entegrasyonu ile bu enerjinin verimli biçimde geri kazanılabileceğini göstermiştir. Yapılan hesaplamalarda, baca gazı sıcaklığının yaklaşık 185 °C'den 130 °C'ye düşürülebileceği ve bu iyileştirmenin yaklaşık 36,9 kW geri kazanılabilir ısı potansiyeli oluşturduğu belirlenmiştir. Bu değer, yıllık bazda 161.823,76 kWh enerji tasarrufu, 15.209 Sm³ doğal gaz azaltımı ve yaklaşık 27,47 ton CO₂ emisyon düşüşü anlamına gelmektedir. Ekonomik değerlendirmelerde ise uygulamanın yıllık 292.770,56 TL tasarruf sağladığı ve yatırımın yaklaşık 2,49 yıl gibi kısa bir sürede geri dönebileceği hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, ekonomizer uygulamasının hem enerji verimliliğini artıran hem de çevresel etkileri azaltan sürdürülebilir ve uygulanabilir bir çözüm olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu bulgular doğrultusunda; yüksek baca gazı sıcaklığına sahip tüm kazan sistemlerinde ekonomizer uygulaması öncelikli bir verimlilik yatırımı olarak değerlendirilmelidir. Sistemin sürdürülebilir performans sağlayabilmesi için baca gazı sıcaklığı ile su giriş-çıkış sıcaklıklarının düzenli biçimde izlenmesi ve kayıt altına alınması önerilmektedir. Ekonomizlerden elde edilen sıcak suyun proses ön ısıtma, sosyal alan kullanımı veya diğer yardımcı sistemlerde değerlendirilmesi toplam verimi artıracaktır. Enerji yönetimi süreçlerinin etkinliği açısından uygulamanın ISO 50001 Enerji Yönetim Sistemi ile uyumlu yürütülmesi tavsiye edilmektedir. Ayrıca uygulama ile elde edilen CO₂ azaltımının, işletmenin karbon

ayak izi raporlamasında ve sürdürülebilirlik çalışmalarında önemli bir avantaj sağlayacağı dikkate alınmalıdır.

KAYNAKÇA(REFERENCES)

- Rosti, B., Omidvar, A., & Monghasemi, N. (2020). Optimal insulation thickness of common classic and modern exterior walls in different climate zones of Iran. *Journal of Building Engineering*, 27, 100954. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100954>
- Kayfeci, M. (2014). Determination of energy saving and optimum insulation thicknesses of the heating piping systems for different insulation materials. *Energy and Buildings*, 69, 278–284. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.010>
- Akkoyunlu, M. T. (n.d.). Yatağan linyitinin akışkan yatakta kurutulmasının incelenmesi (s. 29). [Rapor/çalışma notu].
- Tokgöz, N., & Özgün, Ö. (2019). Atık ısı geri kazanım sistemlerine yönelik literatür araştırması ve sanayiden örnek vaka incelemesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(2), 57–72. <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.611234>
- Koneko Enerji. (2025, Ekim 13). Ekonomizer teknik dokümanı. <https://www.konukisi.com/Assets/Documents/Koneko-Ekonomizer.pdf>
- Omar Baneaz, M. O., & Akkoyunlu, M. T. (2023). Türkiye’de bina kaplama parametrelerinin tasarruf optimizasyon analizi: Enerji verimliliği simülasyon programları ve enerji verimliliği üzerine bir çalışma. *Ekolojik Mühendislik Dergisi*, 24(9), 202–217.
- Beta Kazan. (2025, Ekim 13). FWE model technical specifications. <https://betakazan.com/wp-content/uploads/2024/10/FWE-Model-Technical-Specifications.pdf>
- Uysal, H. L. (2019). Endüstriyel boyahane tesislerinde baca gazı atık ısısının geri kazanım analizi ve bir uygulama (Yüksek lisans tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü), s. 24.
- Mobley, R. K. (1991). *Plant engineer’s handbook*. [Yayınevi bilgisi eksik], USA.
- Akkoyunlu, M. C., & Engin, O. (n.d.). Kesikli harmoni arama algoritması ile optimizasyon problemlerinin çözümü: Literatür araştırması. [Makale].
- Uysal, H. L. (2019). Endüstriyel boyahane tesislerinde baca gazı atık ısısının geri kazanım analizi ve bir uygulama (Yüksek lisans tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü), s. 22.
- IPCC. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 2: Energy, Chapter 1 – Introduction. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_1_Ch1_Introduction.pdf

IPCC. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 2: Energy, Chapter 2 – Stationary Combustion. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_2_Ch2_Stationary_Combustion.pdf

BÖLÜM 28

Kazan Sisteminde Brülör Ayarı Yapılması

Muhammet Şaka¹ & Mustafa Tahir Akkoyunlu² & Alparslan Turanboy³

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye, ORCID: 0009-0008-0807-334X

² Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye, ORCID:0000-0001-5748-6759

³ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye, ORCID: 0000-0002-9908-5387

GİRİŞ

Günümüzde sanayi sektörü ve binalarda kullanılan kazanlarda enerji yönetimi, yalnızca ekonomik verimlilik açısından değil aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik ve enerji arz güvenliği bakımından da stratejik bir öneme sahiptir. Enerji ihtiyacının büyük oranda ithalat yoluyla karşılandığı Türkiye gibi ülkelerde, kazan sistemlerinde uygulanacak enerji verimliliği artırıcı önlemler; yakıt tüketiminin azaltılması, işletme maliyetlerinin düşürülmesi ve sera gazı emisyonlarının azaltılması açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu kapsamda, kazanlarda yanma veriminin artırılması, ısı kayıplarının en aza indirilmesi, atık ısının geri kazanımı ve otomatik kontrol sistemlerinin etkin biçimde kullanılması gibi teknik uygulamalar hem enerji kaynaklarının etkin kullanımını sağlamakta hem de dışa bağımlılığın azaltılmasına önemli katkı sunmaktadır.

Kazanlarda enerji verimliliği, yanmanın mükemmelliğine ve yanma sonucu açığa çıkan ısı enerjisinin kazan içindeki akışkana transfer oranına, baca gazı emisyonları ise yine yanmanın kalitesine, ocak ve brülör tasarımı, ayrıca kullanılan yakıt içerisindeki kirleticilere bağlı olmaktadır. Bu nedenle işletme döneminde, kazanlarda termik verimin sürekli olarak yüksek tutulabilmesi ve emisyonların kontrol edilebilmesi için baca gazı analizörleri yardımıyla, baca gazı bileşenlerinin sürekli veya periyodik olarak izlenmesi ve yanmaya etki eden parametrelere zamanında müdahale edilmesi, ayrıca brülörlerin duruş zamanlarında kazanların neden olduğu iç soğutma kayıplarının minimize edilmesi önemli olmaktadır [1].

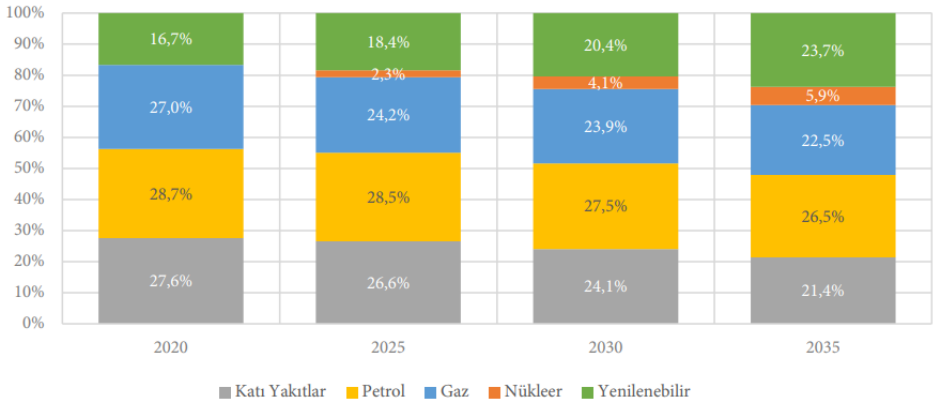
Yakıt cinsine ve hava fazlalık katsayısına bağlı olarak karbonmonoksit oluşumuna neden olmayacak şekilde, baca gazları içerisinde oksijen oranının mümkün olduğunca düşük olması istenmektedir. Doğalgazda %2-3, sıvı yakıtta %3-4, katı yakıtta %5- 6 oksijen oranı baca gazı analizleri için ideal değerler olarak kabul edilmektedir [2].

Birincil Enerji Tüketimi

Doğal süreçlerin bir sonucu olarak oluşan birincil enerji kaynakları, dönüşüme uğramamış ham enerji kaynaklarıdır. Bu kaynaklar, enerji üretiminde doğrudan kullanılabileceği gibi uygun teknolojiler aracılığıyla ikincil enerji kaynaklarına çevrilerek de değerlendirilebilir.

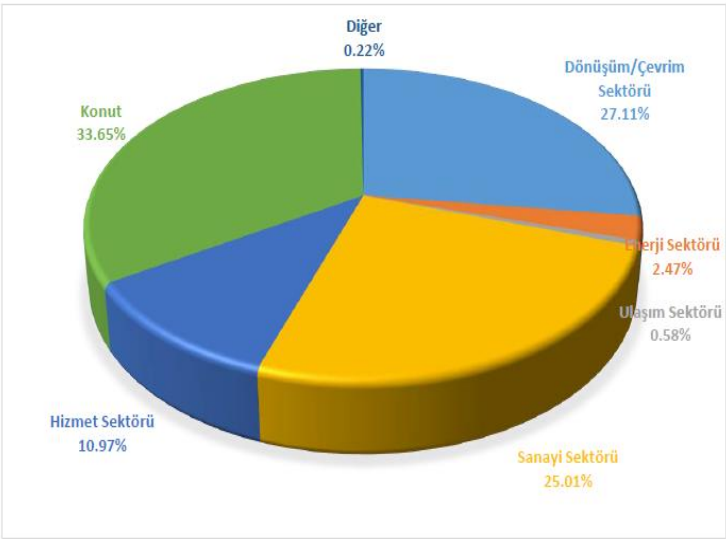
Ülkemizin 2020 yılı birincil enerji tüketimi 147,2 Mtep olarak gerçekleşmiştir. Yapılan senaryolara göre 2035 yılına kadar birincil enerji tüketimi 205,3 Mtep'e yükselmektedir. 2000-2020 döneminde yıllık ortalama %3,1 oranında artış göstermiş olan birincil enerji tüketimi, 2020-2035 döneminde %2,2 düzeyinde artmaktadır. 2020 yılında 1,7 tep/kşi olan kişi başı birincil enerji tüketimi 2,1 tep/kşi düzeyine çıkmaktadır. 2020 yılında %16,7 olan birincil enerji tüketimi içindeki yenilenebilir enerji kaynaklarının payı 2035 yılına kadar %23,7 bandına yükselmektedir. Nükleer enerji ise 2035 yılına kadar %5,9'luk

paya ulaşmaktadır. 2020 yılında %83,3 olan fosil kaynakların payı 2035 yılına kadar %70,4 olarak gerçekleşmektedir. Kömürün payı %21,4'e inerken, petrol %26,5, doğal gaz %22,5'e gerilemektedir [3].



Şekil 1. Kaynaklara Göre Birincil Enerji Tüketiminin Dağılımı [4]

2022 yılının sektörel dağılımı yüzde olarak hesaplandığında; konut tüketimi %33,65, elektrik üretimi için tüketim %27,11 ve sanayi tüketimi %25,01 olarak gerçekleşmiştir. Diğer temel sektörleri de kapsayan bu durum Şekil 2.'de görülmektedir [5].



Şekil 2. 2022 Yılı Doğal Gaz Sektörel Tüketim Dağılımı (%) [5]

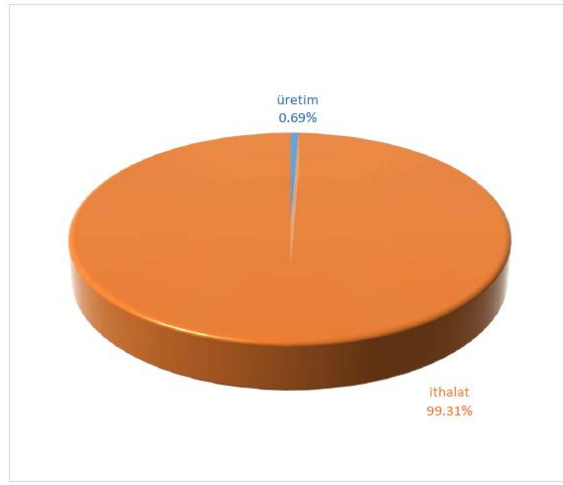
Ülkemizde doğal gaza talebin her geçen gün artması ve yurt içi rezerv ve üretim miktarlarının da bu talepleri karşılamak için yeterli olmaması, 2022 yılında da doğal gaz ithalatını zorunlu kılmıştır. Şekil 3.'te de görüleceği üzere, ülkemizin toplam doğal gaz arzının %0,67'ü Türkiye'de üretilen doğal gaz ile geri kalan %99,31'lik kısmı da yurt dışından ithalat lisansı sahibi şirketler tarafından değişik kaynaklardan gerçekleştirilen ithalat ile karşılanmıştır [6].

Tablo 1. Sektörlere Göre Doğal Gaz Tüketim Miktarları (milyon Sm³) [7]

Sektör	2021	2022
Dönüşüm/Çevrim Sektörü	20.833,86	14.508,4
Enerji Sektörü	1.810,58	1.324,21
Ulaşım Sektörü	313,43	312,89
Sanayi Sektörü	15.289,31	13.383,45
Hizmet Sektörü	4.773,37	5.869,49
Konut	16.678,87	18.007,26
Diğer Sektörler	154,76	115,36
Genel Toplam	59.854,17	53.521,06

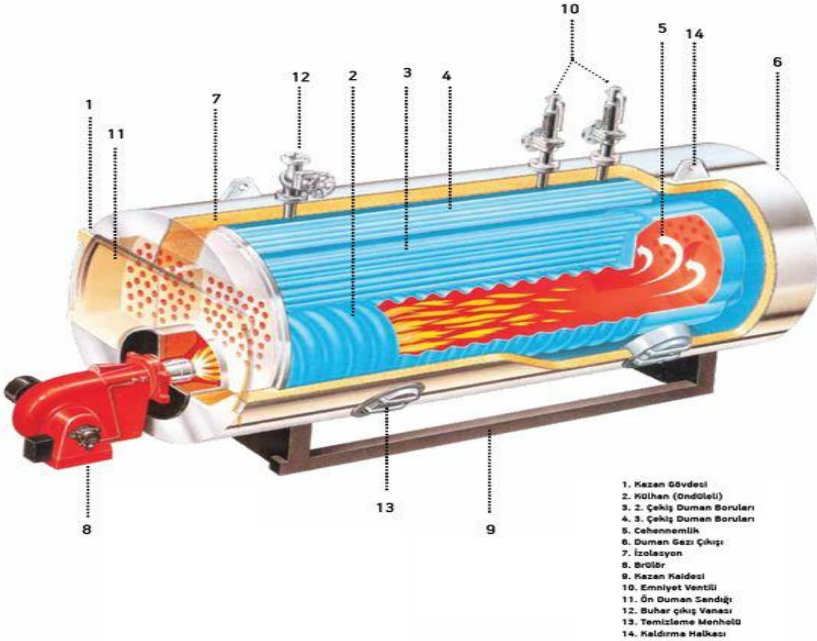
Tablo 2. Yıllara Göre Doğal Gaz Piyasası Genel Görünümü (milyon Sm³) [8]

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Değişim (%)
İthalat	55.249,95	50.282,05	45.211,47	48.125,51	58.703,93	54.661,67	-6,89
Üretim	354,15	428,17	473,87	441,27	394,44	379,81	-3,71
İhracat	630,67	673,29	762,68	577,52	382,89	581,43	51,86
Tüketim	53.857,14	49.204,14	45.285,5	48.261,35	59.854,17	53.521,06	-10,58
Dönem Sonu Stok	2.948,37	3.167,23	3.095,44	2.852,0	1.914,17	53.34,46	178,68



Şekil 3. 2022 Yılı Toplam Doğal Gaz Arzının Karşılandığı Kaynakların Payları (%) [6]

Sanayi tesislerinde doğalgazla çalışan kazanlar, üretim süreçlerinde ısı enerjisi ve buhar sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kazanlar; gıda, tekstil, kimya, ilaç, kâğıt ve otomotiv gibi birçok sektörde kullanılmaktadır.



Başlıca Kullanım Amaçları;

Buhar üretimi: Proses, ısıtma, sterilizasyon, kurutma vb.

Sıcak su üretimi: Yıkama, temizlik ve bazı kimyasal özellikler

Isıtma: Mahal ısıtma

Tercih Edilme Nedenleri İse;

Yüksek verimlilik: %90 seviyelerinde verimle çalışma

Düşük Emisyon: Diğer fosil yakıtlara göre daha çevrecidir

Otomasyon: Otomatik kontrol sistemleriyle izleme ve yönetim kolaylığı sağlar

Daha Az Bakım: Temiz yandığı için kurum ve tortu oluşumu azdır

Hızlı Yanıt Süresi: Kısa sürede istenilen sıcaklık veya buhar basıncına ulaşır

Terimler:

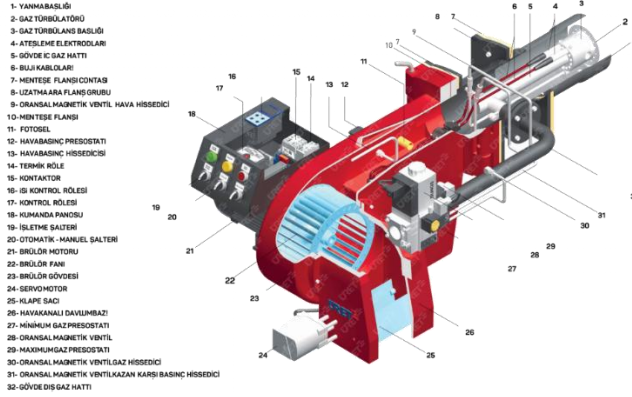
Brülörler

Brülörler sıvı ve gaz yakıt yakmak için kullanılır. Brülör yakıt ve havayı uygun oranda karıştırır, tutuşturur, alevin yanma odası içindeki pozisyonunu ayarlar ve yakıt yanma hızını ayarlar. Böylece emniyetli ve kontrollü bir biçimde yanma enerjisini açığa çıkarır [10].

Brülörler kullanılan yakıt ve özelliklerine, kullanım amacına ve yerine göre farklılık göstermektedir. Genelde uygulamaya özel olarak ve kullanılan yakıt özellikleri göz önüne alınarak üretilirler. Bu özellikler [11] şunlardır:

- ❖ Isıl değeri
- ❖ Hava ihtiyacı
- ❖ Brülöre iletim basıncı
- ❖ Yoğunluk oranı
- ❖ Kimyasal kompozisyonu

Basit yapılı brülörler olduğu gibi karmaşık yapılı brülörler de mevcuttur. Hava emiş fanı gövdesinde bulunan gelişmiş bir brülör ve ekipmanları Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Örnek Bir Gaz Yakıt Brülörü ve Ekipmanları [12]

Katı Yakıt Yakan Brülörler

Bu brülör daha büyük alanlarda kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Konutların ve sitelerin merkezi ısıtma sistemlerinde ve sanayide yüksek ısı üretimi gerekli yerlerde kullanılmaktadır. Brülör, toz kömür, prina (zeytin posasının ve çekirdeğinin kurutulmasından elde edilmektedir) ve diğer alternatif katı yakıtları yakar.

Sıvı Yakıt Yakan Brülörler

Sıvı yakıt brülörleri üç grupta toplanabilir:

- Buharlaştırıcı brülörler (Karbüratörlü)
- Pompalı brülörler
- Dönel brülörler

Isıtma amacı ile buharlaştırıcı brülör kullanımı yaygın değildir. Kalorifer kazanlarında daha çok diğer iki tip brülör kullanılır. Pompalı brülörler 400,0 kg/h kapasitelere kadar monoblok olarak yapılır. Fan, pompa, motor, filtre, ısıtıcı ve

kontrol elemanları kendi üzerindedir. Tam otomatik, tek veya çift kademeli olabilirler. Kumanda on-off veya oransal olabilir. Özellikle büyük kapasitelerde oransal kontrol yakıt ekonomisi sağlar. Dönel brülörler genellikle büyük işletmelerde kullanılırlar ve oransal kontrollüdür. Büyük kapasiteli brülörlerde yakma havası ayrı bir fanla sağlanır ve kanalla brülörün özel girişine adapte edilir.

Doğal Gaz Yakan Brülörler

Gaz yakıt diğer yakıtlarla karşılaştırıldığında en kolay yakılan ve dolayısı ile gaz yakıt brülörü en basit yapıya sahip olan brülör tipidir. Doğal gaz brülörünün temel görevi yakıt ve havayı karıştırmak ve ateşlemektir. Ayrıca yanmanın kontrolü ve güvenlikle ilgili fonksiyonları vardır. Gaz brülörleri iki ana gruba ayrılır;

- Üflemesiz (Atmosferik) gaz brülörleri
- Üflemeli (Fanlı) gaz brülörleri

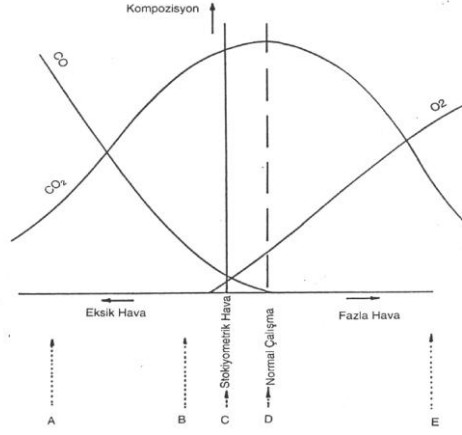
Üflemeli gaz brülörleri ise günümüzde ikiye ayrılmaktadır;

- Ön karışimsız (difüzyon alevli) üflemeli gaz brülörleri
- Ön karışimli üflemeli gaz brülörleri

Ön karışimli brülörler son yıllarda geliştirilen ve atmosferik brülör alternatifi olarak kullanılan tip brülörlerdir. Özellikle düşük emisyon değerleri ve oransal kapasite kontrol imkânı ile öne çıkan ve daha çok modern kazanlarda kullanılan brülör tipidir.

Çift Yakıtlı Brülörler

Çift yakıtlı brülörler üflemeli brülörlerin hem sıvı yakıt hem de doğal gaz yakabilen kombine tipleridir. Ancak çift yakıtlı brülörler 1.000,0 kg/h ve daha büyük kapasiteli tesislerde (termik santraller, büyük fabrikalar vb.); doğal gazı kesintili tarifieden daha ucuza almak için kullanılır. 500,0 kg/h değerinden daha küçük kapasitelerde verim, işletme ve servis problemleri nedeniyle tercih edilmeleri pratik değildir. Ayrıca satın alma maliyeti çok fazladır [13].



Şekil 6. Yanma [14]

Baca Gazı Kompozisyonu

Stokiyometrik orandan fazla veya eksik hava ile yakma işleminin gerçekleştirilmesi kazanı terk eden yanma gazı kompozisyonunu değiştirir. Bu nedenle egzoz gazının analiz edilmesi ile kazandaki yanma işleminin niteliği hakkında bilgi edinilebilir.

Yanma Çeşitleri

Az Hava ile Yanma

- Alev rengi olması gerekenden daha koyu renkte,
- Baca gazı analizörü ile baca gazı analizi yapıldığında fazla miktarda CO görülür,
- Isı geçiş yüzeylerinde is ve kurum birikir,
- Isı geçişi zorlaşır,
- Yakıtın kimyasal enerjisinin tamamını ısıya çeviremediğimiz için yakıt tüketimi artar,

- Zararlı CO ile çevre kirliliğine neden oluruz.

Fazla Hava ile Yanma

- Alev rengi çok açık ve parlaktır,
- Baca gazı hemen hemen gözle görülmez,
- Ocak sıcaklığı düşer, baca gazı sıcaklığı artar,
- Aynı miktardaki buharı elde etmek için daha fazla yakıt yakmak durumunda kalınır,
- Çevreyi daha fazla kirletmiş oluruz,
- Hem ekonomi yönünden hem çevre sağlığı yönünden olumsuz sonuçları oluşur.

Tam Yanma

- Alev rengi katı ve sıvı yakıtlarda açık sarı portakal renginde, gaz yakıtlarda ise mavidir,
- Yanma ürünlerinde ve geri kalan kısımlarda yanıcı madde bulunmaz,
- Baca gazı içinde CO bulunmaz,
- O₂ ölçümü ile de yanmanın fazla hava yönünde olup olmadığı araştırılmalıdır.

Fazla Hava ile Olan Isı Kaybı

Mevcut durumda kullanılan havanın, teorik (hava miktarına bölünmesiyle elde edilen değer **hava fazlalık katsayısı** olarak isimlendirilir.

$$\text{Fazla Hava Oranı (\%)} = [(CO_2)_{\max} / CO_2 - 1] * 100$$

$$\text{Fazla Hava Oranı (\%)} = [(O_2) / 21 - O_2] * 100$$

$$\text{Hava Fazlalık Katsayısı} = \text{Fazla Hava Oranı} / 100 + 1 \quad [15]$$

1. DOĞAL GAZ YAKITLI KAZANDA ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE TASARRUF POTANSİYELİ

Bu çalışmada, 1.600,0 kg/h buhar üretim kapasiteli bir buhar kazanına ait baca gazı analiz cihazı ile baca gazı çıkışından kimyasal değerler ölçülmüş, termal kamera kullanılarak kazan yüzey sıcaklık dağılımı belirlenmiş ve doğalgaz sayacından elde edilen tüketim verileri ele alınmıştır. Elde edilen veriler ışığında, brülör hava/yakıt oranının optimizasyonu gerçekleştirilerek yanma veriminin artırılması ve enerji kayıplarının azaltılması hedeflenmiştir. Ayrıca yapılan teknik

hesaplamalarla birlikte ekonomik analizler de sunularak hava/yakıt oranı optimizasyonunun enerji verimliliği üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur.

Optimizasyon, hemen her alanda kullanılan bir kavram olup kazancı maksimum ve maliyeti minimum yapmayı amaçlamaktadır [16].

Çoğu enerji kaynağı iklim şartlarına bağlıdır bu yüzden enerjinin tasarım, planlama ve kontrol aşamasında optimizasyon yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir [17].

Geri kazanılan enerjinin miktarı, kullanım senaryoları ve yatırımın geri dönüş süresi detaylı biçimde incelenmiştir. Bununla birlikte sistem bileşenlerinin performans karakteristikleri de dikkate alınarak toplam verimlilik değerlendirilmiştir.

Çalışmanın sonunda, enerji tasarrufu potansiyeli ve karbon salımı azaltımı gibi çevresel katkılar ortaya konmuştur. Bu doğrultuda elde edilen veriler yalnızca teorik değil aynı zamanda pratik düzeyde de uygulanabilir çözüm önerileri sunmakta ve enerji verimliliği alanında somut bir uygulama örneği oluşturmaktadır.

Enerji sistemlerine yapılan yatırımların teknolojik, sosyo-ekonomik ve çevresel özelliklere göre değerlendirilmesi gerekmektedir [18].

1.1. Kazan Etiket Bilgileri

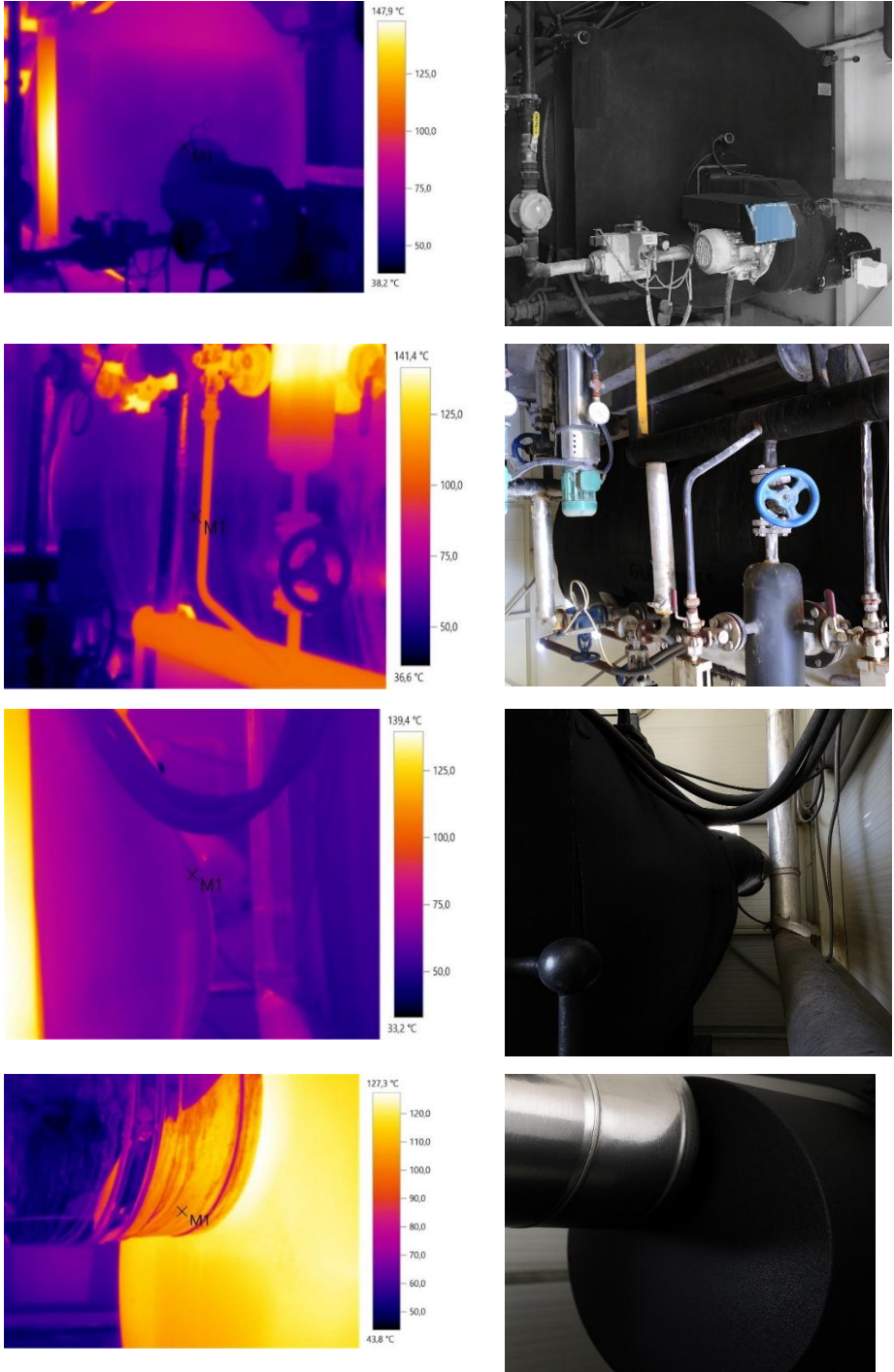
Tablo 3. İncelenen Kazana Ait Teknik Özellikler

Özellik	Değer
Ürün / Product	Gaz / Sıvı Yakıtlı Buhar Kazanı (Gas / Liquid Fuel Fired Steam Boiler)
İzin Verilen Maks / Min Sıcaklık Derecesi (TS)/ Max / Min Allowable Temperature (TS)	0 / 167 °C
İzin Verilen Maksimum Çalışma Basıncı (PS) / Max /Min Allowable Working Pressure (PS)	6,0 bar
Emniyet Ventili Ayar Basıncı/ Safety Valve Set Pressure (PS)	6,3 bar
Kapasite / Capacity	1.600,0 kg/h
Maksimum Isı Gücü / Maximum Heat Output	1.047,0 kW
Hidrostatik Test Basıncı (PT)/ Hydrostatic Test Pressure (PT)	9,61 bar
Üretim Yılı / Production Year	2018



Şekil 7. Kazana Ait Örnek Görsel

1.1.2. Kazan Sistemi Üzerinde Gerçekleştirilen Ölçümler



Şekil 8. Kazan Termal Kamera Ölçümleri



Şekil 9. Kazan Baca Gazı Ölçüm Ekranı

Tablo 4. Kazan Baca Gazı Ölçüm Sonuçları

Baca Gazı Sıcaklığı (°C)	157,0
Oksijen (%O2)	10,77
Karbonmonoksit (ppmCO)	9,0
Karbondioksit (% CO2)	5,84
Fazla Hava Oranı (λ)	2,05
Çevre/Ortam Sıcaklığı (°C)	32,1

Buhar kazanına ait baca gazı analiz sonuçları, termal kamera ölçümleri ve doğalgaz sayacından elde edilen tüketim verileri kullanılarak yanma verimi

hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen hesaplamalar sonucunda elde edilen performans parametreleri ve verim değerleri aşağıda detaylı olarak sunulmuştur.

Tablo 5. Kazan Verim Hesabı

Kategori	Alan	Parametre	Değer	Birim
Ölçüm Sonucu	–	O ₂ (Oksijen)	10,77	%
Ölçüm Sonucu	–	CO(Karbonmonoksit)	9,00	ppm
Ölçüm Sonucu	–	Baca Gazı Sıcaklığı (T _b)	157,00	°C
Ölçüm Sonucu	–	Ortam Sıcaklığı (T _o)	32,10	°C
Yakıt	–	Doğal Gaz	-	Sm ³ /h
Yakıt	–	Doğal Gaz Tüketimi	40,00	Sm ³ /h
Alt Isıl Değer	–	Alt Isıl Değer (LHV)	8.250,00	kcal/h
Yakıt ve Isıl Değer	–	Yakıt Tarafından Verilen Isı (HHV)	330.000,00	kcal/h
Baca Gazı Değeri	–	Teorik CO ₂ : (CO ₂)max	11,74	%
Baca Gazı Değeri	–	Fiili CO ₂ : (CO ₂)me	5,72	%
Baca Gazı Değeri	–	K katsayısı (kuru gaz) K	0,311	–
Yüzey Kaybı Detayı	Ön Yüzey	Alan	3,060	m ²
Yüzey Kaybı Detayı	Ön Yüzey	Yüzey Sıcaklığı	74,00	°C
Yüzey Kaybı Detayı	Ön Yüzey	Ortam Sıcaklığı	32,10	°C
Yüzey Kaybı Detayı	Ön Yüzey	Emissivite (E)	0,95	–
Yüzey Kaybı Detayı	Ön Yüzey	Konveksiyon Kats. (B)	1,45	–
Yüzey Kaybı Detayı	Ön Yüzey	Ur	7,499	W/m ²
Yüzey Kaybı Detayı	Ön Yüzey	Uc	3,689	W/m ² ·K
Yüzey Kaybı Detayı	Ön Yüzey	(Ur+Uc)·A·ΔT	1.434,484	W
Yüzey Kaybı Detayı	Sol Yan Yüzey	Alan	4,68	m ²
Yüzey Kaybı Detayı	Sol Yan Yüzey	Yüzey Sıcaklığı	60,00	°C
Yüzey Kaybı Detayı	Sol Yan Yüzey	Ortam Sıcaklığı	32,10	°C

Kategori	Alan	Parametre	Değer	Birim
Yüzey Kaybı Detayı	Sol Yan Yüzey	Emissivite (E)	0,95	–
Yüzey Kaybı Detayı	Sol Yan Yüzey	Konveksiyon Kats. (B)	1,45	–
Yüzey Kaybı Detayı	Sol Yan Yüzey	Ur	7,011	W/m ²
Yüzey Kaybı Detayı	Sol Yan Yüzey	Uc	3,332	W/m ² ·K
Yüzey Kaybı Detayı	Sol Yan Yüzey	(Ur+Uc)·A·ΔT	1.350,55 4	W
Yüzey Kaybı Detayı	Sağ Yan Yüzey	Alan	4,68	m ²
Yüzey Kaybı Detayı	Sağ Yan Yüzey	Yüzey Sıcaklığı	72,00	°C
Yüzey Kaybı Detayı	Sağ Yan Yüzey	Ortam Sıcaklığı	32,10	°C
Yüzey Kaybı Detayı	Sağ Yan Yüzey	Emissivite (E)	0,95	–
Yüzey Kaybı Detayı	Sağ Yan Yüzey	Konveksiyon Kats. (B)	1,45	–
Yüzey Kaybı Detayı	Sağ Yan Yüzey	Ur	7,428	W/m ²
Yüzey Kaybı Detayı	Sağ Yan Yüzey	Uc	3,644	W/m ² ·K
Yüzey Kaybı Detayı	Sağ Yan Yüzey	(Ur+Uc)·A·ΔT	2.067,47 8	W
Yüzey Kaybı Detayı	Arka Yüzey	Alan	3,060	m ²
Yüzey Kaybı Detayı	Arka Yüzey	Yüzey Sıcaklığı	86,00	°C
Yüzey Kaybı Detayı	Arka Yüzey	Ortam Sıcaklığı	32,10	°C
Yüzey Kaybı Detayı	Arka Yüzey	Emissivite (E)	0,95	–
Yüzey Kaybı Detayı	Arka Yüzey	Konveksiyon Kats. (B)	1,45	–
Yüzey Kaybı Detayı	Arka Yüzey	Ur	9,223	W/m ²
Yüzey Kaybı Detayı	Arka Yüzey	Uc	4,414	W/m ² ·K
Yüzey Kaybı Detayı	Arka Yüzey	(Ur+Uc)·A·ΔT	3.584,53 6	W
Yüzey Kaybı Detayı	Tüm Yüzeyler	TOPLAM (Ur+Uc)·A·ΔT	8.437,05 2	W
Isı Kayıpları	–	Kuru Baca Gazı Kaybı (L _{kgb})	7,53	%
Isı Kayıpları	–	Nem Nedeniyle Isı Kaybı (L _{nbg})	1,76	%

Isı Kayıpları	–	CO Nedeniyle Isı Kaybı (L _{co})	0,01	%
Isı Kayıpları	–	Yüzey Kaybı (L _{rk})	2,20	%
Isı Kayıpları	–	Toplam Isı Kaybı (L)	11,50	%
Özet	–	Kazan Verimi	88,50	%

1.1.3. Kazan Brülör Ayarı (Hava Ayarı) Uygulama Analizi

Buhar kazanı, baca gazı ölçüm sonuçları ile verim hesaplamaları yapılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda verim değerleri ideal değer olarak kabul edilen %90 seviyesine yakın çıkmıştır. Kazan baca gazı sıcaklığı uygun olmayan kazanlar mevcuttur (<130°C). Oksijen (%2-3) değeri uygun değildir. Karbonmonoksit (<100ppm) değeri ideal sınırlar içerisinde.

Buhar Kazanına Brülör Ayarı Yapılması

Tablo 6. Brülör Ayarı Sonrası Verim Hesabı

Kazan Adı	Mevcut Kazan Verimi (%)	Brülör Ayarı Sonrası Kazan Verimi (%)
Buhar Kazanı	88,50	91,76

Mevcut durumda kazan brülör ayarı yapılarak oksijen oranlarının ideal seviyeye getirilmesi (Baca gazında O₂ = %3) sonucu doğal gaz tasarrufu sağlanabileceği öngörülmektedir. Sağlanacak tasarrufun miktarı ve yatırım geri ödeme süresi aşağıda hesaplanmıştır.

Tasarruf Miktarı= Mevcutta Tüketilen Enerji x [(Yeni Verim – Eski Verim) / Yeni Verim]

Kazan Brülör Ayarı (Hava Ayarı) Sonrası Tasarruf Hesabı:

Tasarruf Miktarı: 40,0 Sm³ /h x [(91,76-88,50) / 91,76]

Tasarruf Miktarı: **1,42 Sm³ /h**

Tablo 7. Doğal Gaz Tasarruf Hesabı

AÇIKLAMA	DEĞER	BİRİM
Buhar Kazanı Mevcut Verim	88,50	%
Buhar Kazanı Yeni Verim	91,76	%
Tasarruf Artış Oranı	3,55	%
Saatlik Doğal Gaz Tüketimi	40,00	Sm ³ /h
Saatlik Doğal Gaz Tasarrufu	1,42	Sm ³ /h
Yıllık Çalışma Saati	5400	h/Yıl
Yıllık Doğal Gaz Tasarrufu	7.668,0	Sm ³ /Yıl
Doğalgaz Birim Maliyeti	17,87	TL/Sm ³

1.2. Brülörün Hava/Yakıt Oranının Optimize Edilmesiyle Kazan Sisteminde Enerji Tasarrufu Potansiyelinin Değerlendirilmesi

Enerji verimliliği, günümüz endüstriyel sistemlerinde kaynak kullanımının etkinliğini artırarak enerji yoğunluğunu azaltmakta, bu sayede; işletmelerin ekonomik maliyetlerin düşürülmesine aynı zamanda da yanma kaynaklı karbon emisyonlarının düşürülmesine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır.

Doğal gaz ile çalışan kazan sistemlerinde kullanılan brülörlerin hava/yakıt oranının doğru şekilde ayarlanması, yanma sürecinin verimli bir şekilde gerçekleşmesini sağlar. Bu optimizasyon sayesinde yakıtın tamamen ve verimli yanması sağlanır.

CO₂ emisyonu hesaplamalarında IPCC tarafından önerilen Tier yaklaşımları kullanılmaktadır [18]. Bu çalışmada karbon ayak izi hesaplamaları için ilk olarak IPCC [19] kılavuzunda yer alan Tier-1 yaklaşımının hesaplama metodolojisi ve emisyon faktörleri seçimi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 10. Doğalgaz Net Kalorifik Değeri [19]

Yakıt Türü	Dönüşüm Faktörü (TJ/Gg)
Doğal Gaz	48

Tablo 11. Doğalgaz Emisyon Faktörü [20]

Yakıt Türü	CO ₂ (kg/TJ)	CH ₄ (kg/TJ)	N ₂ O (kg/TJ)
Doğal Gaz	56.100,0	1,0	0,1

Tablo 12. Tasarruf Potansiyeli Tablosu

Kazan (Adet)	Tasarruf (TEP)	Tasarruf (Doğal Gaz-Sm ³)	Tasarruf (Ton CO ₂ eşdeğer)
1,0	6,33	7.668,0	13,85

SONUÇ

Çalışmada, 1.600,0 kg/h buhar üretim kapasiteli doğalgaz yakıtlı bir kazan sistemi incelenmiştir. Öncelikle baca gazı analiz cihazı kullanılarak CO₂, O₂ ve baca gazı sıcaklığı değerleri ölçülmüş, yanma karakteristikleri belirlenmiştir. Termal kamera yardımıyla kazan yüzey sıcaklık dağılımı kaydedilmiş ve doğalgaz sayacından alınan yakıt tüketim verileriyle birlikte kazanın mevcut verimi hesaplanmıştır.

Bu veriler kullanılarak brülörün hava/yakıt oranı optimize edilmiştir. Optimizasyon sürecinde hedef; yanma verimini artırırken, baca gazı sıcaklığını

ve yakıt tüketimini minimize etmek olmuştur. Optimum ayar, teorik hava miktarı ile ölçülen baca gazı değerleri arasındaki fark dikkate alınarak belirlenmiştir.

Yapılan hesaplamalar sonucunda; brülör ayarının iyileştirilmesiyle baca gazındaki O₂ oranının azaldığı, CO₂ değerinin optimum düzeye geldiği ve kazan veriminde artış gözleendiği belirlenmiştir. Ekonomik analiz kapsamında 2 yıl ekonomik ömür ve %45 iskonto oranı varsayımıyla yatırımın net bugünkü değeri (NBD) ve iç kârlılık oranı (İKO) hesaplanmıştır.

Yapılan çalışma sonucunda, brülör hava/yakıt oranı optimizasyonunun kazan performansı üzerinde doğrudan ve olumlu bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Optimum ayar sayesinde yakıt tüketiminde azalma, yanma veriminde artış ve baca gazı kayıplarında düşüş sağlanmıştır. Bu iyileştirme, kısa geri ödeme süresiyle ekonomik açıdan da uygulanabilir bir enerji verimliliği önlemi olarak değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak, doğal gaz yakıtlı kazanlarda düzenli olarak brülör ayarlarının kontrol edilmesi ve hava/yakıt oranının işletme koşullarına göre optimize edilmesi hem enerji tasarrufu hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir kazanım sağlamaktadır.

KAYNAKÇA(REFERENCES)

- [1] Abdullah BİLGİN, Kazanlarda Enerji Verimliliği ve Emisyonlar
- [2] Tesisat Mühendisliği Dergisi Sayı: 95, s. 13-18, 2006, Kazanlarda Enerji Verimliliği
- [3] Türkiye Ulusal Enerji Planı, 2022 Sf. No:19
- [4] Şekil 6, Türkiye Ulusal Enerji Planı, 2022 Sf. No:20
- [5] Doğal Gaz Piyasası 2022 Yılı Sektör Raporu Sf. No:70-71
- [6] Doğal Gaz Piyasası 2022 Yılı Sektör Raporu Sf. No:24
- [7] Doğal Gaz Piyasası 2022 Yılı Sektör Raporu Sf. No: vii
- [8] Doğal Gaz Piyasası 2022 Yılı Sektör Raporu Sf. No: vii
- [9] <https://cemkimsan.com.tr/buhar-kazanlari/> (Erişim Tarihi: 04.10.2025).
- [10] Enerji Verimliliği Eğitim Kitabı, Sf. No: 227
- [11] Akçaoğlu, A. (2005) “Yüksek Kapasiteli Endüstriyel Sıvı Yakıtta Rotatif Tip Brülörler”, TESKON2005, Doğal gaz Semineri, 127–141.
- [12] <https://muhendis.web.tr/brulor-nedir-cesitleri-nelerdir/> (Erişim Tarihi: 04.10.2025).
- [13] <https://muhendis.web.tr/brulor-nedir-cesitleri-nelerdir/>(Erişim Tarihi: 04.10.2025).
- [14] Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı, ‘Yakıtlar Yanma Yakma Tesisleri’ Sunumu
- [15] Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı, ‘Yakıtlar Yanma Yakma Tesisleri’ Sunumu
- [16] Akkoyunlu, M. C, & Engin, O. (2011). Kesikli harmoni arama algoritması ile optimizasyon problemlerinin çözümü: Literatür araştırması. Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi, 26(4), 140-148.
- [17] Çayır Ervural, B, Ervural, B., & Evren, R. (2022). Optimization models in energy: A literature review. International Journal of Energy Research, 46(8), 1234–1250
- [18] A. SARUCAN, M. C. AKKOYUNLU, A. ‘Baş Analitik Hiyerarşi Proses Yöntemi ile Rüzgâr Türbin Seçimi’
- [19] https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_1_Ch1_Introduction.pdf Erişim Tarihi: (15.10.2025).
- [20] https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_2_Ch2_Stationary_Com bustion.pdf Erişim Tarihi: (15.10.2025).

BÖLÜM 29

Antroposen Çağında Mikroplastikler: Kaynaklar, Taşınım Dinamikleri ve Küresel Ekolojik Riskler

**Rozelin Aydın¹ & Özge Petek Köseadağ² &
Fatma Pelin Altınler Kara³**

¹ Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, Sarıçam, ORCID: 0000-0002-7822-734X

² Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, Sarıçam, ORCID: 0000-0002-3465-7532

³ Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kent Çalışmaları Anabilim Dalı, Sarıçam, Adana. ORCID: 0009-0002-1611-6123

1. GİRİŞ

1.1. Antroposen Çağının Jeolojik ve Ekolojik İmzası: Küresel Plastik Krizi

İnsanlık tarihi, kullandığı malzemelere göre çağlara ayrılmıştır (Taş, Tunç, Demir); 20. yüzyılın ortalarından itibaren ise modern medeniyet, "Plastik Çağı" olarak adlandırılan yeni bir döneme girmiştir. Ancak sentetik polimerlerin sunduğu hafiflik, dayanıklılık ve düşük maliyet avantajları, günümüzde gezegenin biyosferi için geri dönüşü zor bir ekolojik krize dönüşmüştür. Küresel plastik üretim istatistikleri bu krizin eksponansiyel artışını gözler önüne sermektedir: 1950 yılında yıllık sadece 1.7 milyon ton (Mt) olan üretim, 2015 yılı itibarıyla 322 milyon tona ulaşmış ve günümüze kadar kümülatif olarak 8.3 milyar tonun üzerinde bakır plastik üretildiği tahmin edilmektedir (Geyer vd., 2017). Bu devasa üretimin dramatik bir sonucu olarak, yetersiz atık yönetimi ve kaçak akışlar nedeniyle her yıl karasal kaynaklardan okyanuslara 4.8 ila 12.7 milyon ton arasında plastik atığın girdiği hesaplanmaktadır (Jambeck vd., 2015).

Deniz ortamına ulaşan bu sentetik polimerler, doğada biyolojik bozunmaya karşı gösterdikleri yüksek direnç nedeniyle yüzyıllarca varlıklarını sürdürebilmektedir. Ancak bu kalıcılık, onların bütünlüğünü koruduğu anlamına gelmez; güneş ışığı kaynaklı fotodegradasyon (UV), dalga mekaniği ve biyolojik süreçler, makroplastikleri parçalayarak 5 mm'den küçük mikroplastik (MP) ve hatta hücre zarlarını geçebilen nanoplastik formuna dönüştürmektedir (Andrady, 2011). Bu parçalanma süreci, plastiklerin yüzey alanını artırarak ekosistemdeki etkileşim kapasitelerini ve toksikolojik risklerini katlanarak büyötmektedir.

1.2. Ekosistemler Arası Dinamik Bir Süreç: Plastik Döngüsü

Geleneksel çevre bilimi yaklaşımları, plastikleri genellikle okyanuslarda biriken ve orada kalan pasif atıklar olarak ele alma eğilimindedir. Ancak güncel literatür, bu bakış açısını kökten değiştirmiştir. Araştırmacılar mikroplastiklerin karasal, atmosferik, tatlı su ve deniz ekosistemleri arasında sürekli hareket eden biyo-jeokimyasal bir döngü oluşturduğunu savunarak Plastik Döngüsü kavramını ortaya atmıştır (Horton ve Dixon, 2017). Bu yeni paradigmaya göre mikroplastikler; hava akımları, nehirler ve biota aracılığıyla tıpkı karbon veya su döngüsü gibi ekosistem kompartmanları arasında dinamik bir şekilde dolaşmaktadır.

Bu döngü içerisinde nehirler, karasal kaynaklı plastiklerin deniz ortamına taşınmasında ana arterler olarak işlev görürken (Lebreton vd., 2017), atmosferik taşınım mikroplastiklerin en ücra köşelere (dağ zirveleri, kutup bölgeleri) ulaşmasını sağlayan bir hayalet mekanizma olarak çalışmaktadır. Özellikle kentsel tozların ve sentetik tekstil liflerinin rüzgar yoluyla taşınması, mikroplastikleri sadece suyun değil, soluduğumuz havanın da kalıcı bir bileşeni haline getirmiştir (Dris vd., 2016). Ayrıca, tarımsal topraklarda kullanılan plastik

malçlar ve arıtma çamurları, karasal ekosistemlerde biriken plastiklerin yeraltı sularına sızarak akiferleri kirlletme potansiyelini de beraberinde getirmektedir (Chia vd., 2021).

1.3. Bölgesel Odak: Akdeniz Plastik Çorbası ve Çukurova Deltası'nın Kritik Rolü

Küresel ölçekte bir değerdendirme yapıldığında, Akdeniz Havzası, plastik kirliliğinin dünyada en yoğun olduğu bölgelerden biri olarak "Akdeniz Plastik Çorbası" (Mediterranean Plastic Soup) şeklinde nitelendirilmektedir (Suaria vd., 2016). Bölgenin yarı kapalı jeomorfolojik yapısı, yoğun kıyı nüfusu, turizm faaliyetleri ve sınırlı su değışimi sağlayan hidrodinamik özellikleri, mikroplastik birikimini kritik seviyelere taşımaktadır. Türkiye, bu havzada hem kirliliğın önemli bir karasal kaynağı hem de akıntılarla gelen kirliliğın birikim noktası olarak stratejik bir öneme sahiptir.

Özellikle Doğı Akdeniz'de, Mersin ve İskenderun Körfezleri üzerine yapılan çalışmalar, bölgenin nehirler yoluyla taşınan ciddi bir mikroplastik yükü altında olduğunu göstermektedir. Yapılan kapsamlı yüzey taramaları sonucu, Mersin Körfezi'nde metrekaşe başına ortalama 0.68 adet, İskenderun Körfezi'nde ise 0.22 adet mikroplastik tespit edilmiştir (Gündoğıdu ve Çevik, 2017). Kirliliğın mekânsal dağılımı incelendiğinde, Seyhan Nehri'nin denize döküldüğü ağız bölgesinde kirlilik seviyesinin diğeri bölgelere kıyasla dramatik ölçüde yüksek bulunması, nehirlerin bölgedeki kirlilik taşınımında oynadığı kritik "vektör" rolünü kanıtlar niteliktedir (Gündoğıdu ve Çevik, 2017). Ayrıca, Mersin Körfezi'ne dökülen nehirlerin yıllık toplam mikroplastik yükünün 1.2×10^{12} adet parçacığa ulaştığı tahmin edilmektedir (Özgüler vd., 2022). Bölgedeki yoğun tarımsal faaliyetler ve seracılıkta kullanılan polietilen (PE) plastik örtüler, parçalanarak "plastik film" formunda mikroplastik kirliliğının önemli bir bileşenini oluşturmakta ve bu durum bölgesel kirlilik profilini şekillendirmektedir (Gündoğıdu ve Çevik, 2017).

1.4. Biyolojik Etkileşimler: Plastisfer ve Patojen Vektörü Olarak Plastikler

Mikroplastikler, deniz ortamına girdiklerinde sadece inert (etkisiz) fiziksel bir kirlletici olarak kalmaz, aynı zamanda üzerlerinde yaşam barındıran yeni bir ekolojik niş oluştururlar. Zettler vd. (2013), okyanuslardaki plastik atıkların üzerinde oluşan ve çevresel sudan taksonomik olarak tamamen farklılaşmış mikrobiyal toplulukları tanımlamak için "Plastisfer" terimini literatüre kazandırmıştır (Zettler vd., 2013). Plastiklerin hidrofobik yüzeyleri, organik maddeleri adsorbe ederek biyofilm oluşumunu teşvik etmekte ve bu biyofilmler *Vibrio* cinsi gibi potansiyel insan ve hayvan patojenleri ile antibiyotik direnç genlerinin (AMR) taşınmasında "okyanus otostopçusu" rolü oynamaktadır (Queiroga vd., 2025). Bu durum, mikroplastik kirliliğini sadece bir çevre sorunu olmaktan çıkarıp, istilacı türlerin yayılmasına ve hastalık taşınımına zemin

hazırlayan küresel bir biyogüvenlik ve tek sağlık meselesine dönüştürmektedir (Queiroga vd., 2025).

1.5. İnsan Sağlığı Üzerindeki Tehdit: Trofik Transfer ve Biyobirikim

Ekolojik zincirin son halkası olan insanlar, bu yaygın kirlilikten muaf değildir. Mikroplastikler, trofik transfer (besin zinciri) yoluyla zooplanktonlardan balıklara ve kabuklu deniz ürünlerine, oradan da nihai tüketici olan insanlara geçebilmektedir (Dulta vd., 2025). Midye gibi filtreleyici organizmaların tüketimi, tüm sindirim sisteminin yenmesi nedeniyle insan maruziyeti açısından özellikle yüksek risk taşımaktadır (Barboza vd., 2018). Deniz ürünlerinin yanı sıra, Türkiye'de yapılan çalışmalarda sofraya tuzu, içme suyu ve işlenmiş gıdalarda da mikroplastik varlığı rapor edilmiştir (Soysal, 2024).

Yakın zamanda yapılan ve bilim dünyasında büyük yankı uyandıran çalışmalar, sağlıklı insan kanında PET, polietilen ve polistiren gibi polimerlerin varlığını ve ortalama 1.6 µg/ml konsantrasyonda olduğunu kanıtlayarak, plastiğin insan fizyolojisine ne kadar derinlemesine nüfuz ettiğini göstermiştir (Leslie vd., 2022). Mikroplastiklerin insan dokularında oksidatif stres, inflamasyon, sitotoksikite ve endokrin bozukluklara yol açabileceğine dair kanıtlar giderek artmakta olup, bu durum acil önlem alınması gereken bir halk sağlığı tehdidi olarak karşımıza çıkmaktadır (Marcharla vd., 2024). Bu kitap bölümünde, mikroplastiklerin kaynaklarından başlayarak, Türkiye ve Akdeniz özelindeki dağılımı, "Plastisfer" üzerindeki mikrobiyal etkileşimleri ve insan sağlığına yönelik potansiyel riskleri, güncel literatür ışığında kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır.

2. Mikroplastiklerin Kaynakları, Türleri ve Çevresel Dönüşüm Süreçleri

Mikroplastikler (MP), doğrudan küçük boyutlarda üretilen *birincil mikroplastikler* ile daha büyük plastik ürünlerin fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçlerle parçalanması sonucu oluşan *ikincil mikroplastikler* olmak üzere iki ana kategori altında sınıflandırılmaktadır. Bu bölümde mikroplastiklerin kökenleri, polimer özellikleri ve çevresel ortamda geçirdikleri dönüşüm süreçleri literatür ışığında detaylı olarak ele alınmaktadır.

2.1. Birincil ve İkincil Mikroplastikler

2.1.1. Birincil Mikroplastikler

Birincil mikroplastikler, boyutları doğrudan 5 mm'nin altında olacak şekilde üretilen sentetik polimer parçacıklarıdır. En bilinen örnekleri kozmetik ürünlerde, kişisel bakım ürünlerinde, endüstriyel temizlik aşındırıcılarında ve kumlama uygulamalarında kullanılan mikrobuncuklar, mikrokapsüller ve rezin peletlerdir (Anjum vd., 2023). Bu partiküller yüksek oranda küresel geometriye sahiptir ve yoğunluk, elektriksel özellikler ve kimyasal stabilite nedeniyle özellikle sanayi süreçlerinde tercih edilmektedir.

Kozmetik sektöründe mikroboncuk kullanımına ilişkin pek çok ülkede yasaklamalar getirilmiş olsa da, gelişmekte olan ülkelerde üretim ve kullanımın devam ettiği rapor edilmektedir. Bu partiküller arıtma tesislerinde yüksek uzaklaştırma verimleri sağlanamadığı için kolaylıkla atık su yoluyla alıcı ortamlara taşınmakta ve denizlerde önemli bir kirlilik kaynağı oluşturmaktadır (Chia vd., 2021).

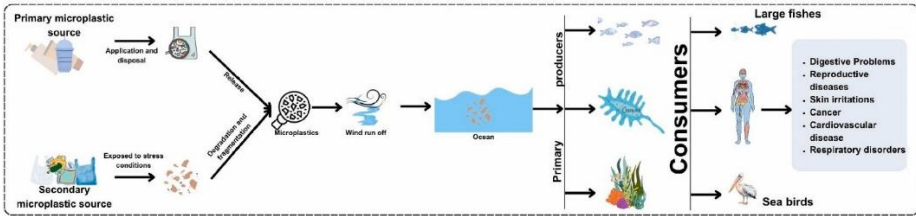
2.1.2. İkincil Mikroplastikler

İkincil mikroplastikler, daha büyük plastik nesnelerin fotodegradasyon, termal oksidasyon, hidroliz, mekanik aşınma ve biyolojik etkileşim sonucu zamanla daha küçük parçalara ayrılmasıyla oluşmaktadır (Andrady, 2011). Bu süreç, çevresel koşullara bağlı olarak yıllar hatta on yıllar boyunca devam edebilir.

Kıyı bölgelerinde dalga enerjisi, kum sürtünmesi ve güneş ışığı bir araya gelerek parçalanma hızını artırırken, derin deniz ortamlarında düşük sıcaklık ve düşük UV ışınımı nedeniyle bu süreç oldukça yavaştır. Bu nedenle yüzey sularında daha fazla ikincil mikroplastik bulunduğu bilinmektedir.

Tarımda kullanılan plastik malç filmlerinin parçalanması, balıkçılık ekipmanlarının sürtünme ile aşınması, PET şişelerin UV kaynaklı kırılma ve yırtılması ve tekstil ürünlerinden lif kopması günümüzde ikincil mikroplastik oluşumunun en önemli kaynakları arasında yer almaktadır.

Aşağıdaki şema (Şekil.1), mikroplastiklerin çevreye salınımından deniz ekosistemine girişine, oradan da besin zinciri boyunca insanlara ve diğer tüketici türlere ulaşmasına kadar uzanan süreci özetlemektedir. Şemada hem birincil hem de ikincil mikroplastik kaynakları gösterilmekte; bu parçacıkların rüzgâr, yüzey akıntıları ve yağış sonrası yüzey akışlarıyla okyanus ortamına taşınması, ardından fitoplankton ve zooplankton gibi birincil üreticiler tarafından alınarak trofik seviyelerde yukarı doğru ilerlemesi vurgulanmaktadır. Bu süreç, balıklar, deniz kuşları ve en nihayetinde insanlar için çeşitli sağlık risklerine yol açmaktadır (Marcharla, vd., 2024).



Şekil 1. Mikroplastiklerin trofik transfer mekanizması*
(*Marcharla, vd., 2024).

2.2. Mikroplastik Türleri: Polimer Yapıları, Morfoloji ve Fiziksel Özellikler

Mikroplastiklerin çevresel davranışları üzerlerinde bulundukları polimer tipine, yoğunluğa, kristalinliğe, renk pigmentlerine ve yüzey kimyasına bağlı olarak değişmektedir. En yaygın polimer türleri şunlardır (ben Stride vd., 2024):

- **Polietilen (PE):** Düşük yoğunluklu, yüzeyde kalma eğiliminde, ambalaj atıkları ve market poşetlerinden türeyen mikroplastikler.
- **Polipropilen (PP):** PE'ye benzer şekilde yüzey sularında yoğun görülür.
- **Polietilen tereftalat (PET):** Yüksek yoğunluklu, genellikle batma eğiliminde, içecek şişelerinin parçalanmasıyla oluşan mikroplastikler.
- **Polistiren (PS):** Köpük yapısı nedeniyle kolay parçalanır; balıkçılık ekipmanlarında yaygındır.
- **Polivinil klorür (PVC):** Kimyasal olarak kararlı ve toksik katkı maddeleri içerdiğinden çevresel açıdan yüksek risklidir.

Yoğunluk Faktörü: PE ve PP gibi düşük yoğunluklu polimerler deniz suyundan daha hafif oldukları için yüzeyde ve su kolonunda asılı kalırken; PVC ve PET gibi yüksek yoğunluklu polimerler hızla sedimente (deniz tabanına) çökme eğilimindedir (Horton & Dixon, 2018).

Hidrofobiklik: Plastiklerin hidrofobik (sudan kaçan) yüzey kimyası, sudaki Kalıcı Organik Kirleticileri (POP'lar) ve ağır metalleri yüzeylerine adsorbe etmelerine (yapışmasına) neden olur. Bu durum, mikroplastikleri sadece fiziksel bir kirleticiden çıkarıp, toksik kimyasalları taşıyan bir vektör haline getirir (Barboza vd., 2018).

Polimer tipinin yanı sıra mikroplastiklerin morfolojik özellikleri de önemlidir. Çevrede lif, film, granül, fragman, köpük ve pelet gibi birçok formda bulunabilirler (Barboza vd., 2018). Bu morfolojik çeşitlilik, organizmaların bu partikülleri yutma eğilimini, su kolonundaki askıda kalma süresini ve sedimente çökme hızını doğrudan etkilemektedir.

2.3. Çevresel Parçalanma Mekanizmaları

2.3.1. Fotodegradasyon

Güneşten gelen UV-B ışınları, plastik polimer zincirlerini kırarak polimerin mekanik özelliklerini zayıflatır. Bu süreç zamanla polimerin daha küçük parçalara ayrılmasına neden olur (Andrady, 2011). UV'ye maruz kalan plastiklerin yüzeyinde oksidatif çatlaklar oluşur ve bu çatlaklar parçalanma hızını artırır.

2.3.2. Termal Oksidasyon

Yüksek sıcaklık ve oksijen varlığında plastiklerin elektron transferine dayalı oksidatif bozulmaya uğramasıdır. Özellikle yüzey filmleri ve poliolefin türleri bu mekanizmaya duyarlıdır. Gündelik kullanımda güneş altında kalan plastiklerin kırılma hızının temel nedeni budur.

2.3.3. Mekanik Parçalanma

Dalga hareketi, kum aşındırması, tekne pervaneleri, fırtınalar ve kıyı sürtünmesi plastikleri fiziksel olarak küçültür. Bu nedenle kıyıdan uzaklaştıkça MP yoğunluğu azalırken, kıyı bölgelerinde daha fazla parçalanmış plastik raporlanmaktadır.

2.3.4. Biyolojik Parçalanma

Bazı bakteri ve mantar türleri plastik yüzeylerinde koloni oluşturarak polimere enzimatik saldırıda bulunabilir. Ancak bu süreç genellikle çok yavaş ilerler. Plastisfer biyofilmleri, mikroplastiklerin kimyasal ve fiziksel özelliklerini değiştirerek parçalanmayı hızlandırabilir veya yavaşlatabilir (Zettler vd., 2013).

2.4. Nano-Boyutlu Parçacıkların Oluşumu ve Önemi

Mikroplastiklerin daha da küçük formlara parçalanmasıyla nanoplastikler (NP; <100 nm) oluşur. Bu partiküller hücre membranlarını aşabilme, kan-beyin bariyerini geçebilme ve biyokimyasal süreçlere doğrudan katılabilme potansiyeli taşımaktadır (Marcharla vd., 2024). Nanoplastikler:

- Daha yüksek yüzey/hacim oranına sahiptir,
- Hidrofobik kirleticileri daha fazla adsorbe eder,
- Biyolojik sistemlerde serbest radikal oluşumunu artırabilir,
- İnsan toksisitesi açısından mikroplastiklere kıyasla daha ciddi risk oluşturur.

Deniz ortamındaki nanoplastiklerin çoğu deneysel metotlarla tespit edilemediğinden, gerçek çevresel konsantrasyonları büyük ölçüde bilinmemektedir. Bu durum NP'lerin risk değerlendirmesini bilimsel olarak daha zorlu bir hale getirmektedir.

3. Mikroplastiklerin Taşınım Dinamikleri: Atmosfer, Nehirler ve Okyanus Sirkülasyonu

Mikroplastiklerin (MP) çevredeki davranışı yalnızca denize bırakıldıktan sonra gerçekleşen lokal süreçlerle açıklanamaz; bunun yerine, kara, atmosfer ve deniz sistemlerinin birbirine bağlı olduğu çok katmanlı bir dolaşım ağı söz konusudur. Güncel çalışmalar, mikroplastiklerin tıpkı karbon ya da su gibi ekosistem bileşenleri arasında sürekli hareket eden bir çevresel döngü oluşturduğunu göstermekte ve bu döngü "Plastik Döngüsü" olarak adlandırılmaktadır (Horton, A. A., & Dixon, S. J., 2018). Bu bölümde atmosferik

taşıyım, nehir akışları ve okyanus sirkülasyonunun mikropplastiklerin uzamsal dağılımını nasıl şekillendirdiği bütüncül bir çerçevede ele alınmaktadır.

3.1. Plastik Döngüsünün Bileşenleri: Ekosistemler Arası Sürekli Hareket

Mikropplastikler, bulundukları ortamda sabit kalmayıp, fiziksel kuvvetler ve ekosistem süreçleriyle sürekli taşınmaktadır. Çalışmalar mikropplastiklerin karasal yüzeylerden atmosfere, buradan sucul ekosistemlere ve tekrar sedimanlara uzanan çok yönlü bir hareket paterni izlediğini belirtmektedir (Horton & Dixon, 2018). Bu döngünün temel mekanizmaları üç başlıkta toplanabilir:

1. Atmosferik taşıyım: Rüzgâr, tekstil liflerinin aşınması, toz partikülleri ve şehirselle aktivite yoluyla mikropplastiklerin havaya karışması.
2. Nehir sistemleri: Karasal kirliliğin yüzey akışı ve atık sular yoluyla akarsulara, oradan denizlere taşınması (Özgüler vd., 2022).
3. Okyanus sirkülasyonu: Yoğunluk farkları, rüzgâr kaynaklı yüzey akıntıları ve derin su hareketleriyle deniz ortamında geniş çaplı dağılım (Suaria vd., 2016).

Bu çerçeve, mikropplastiklerin yalnızca yerel kirlilik unsurları olmadığını, küresel ölçekte dolaşan kalıcı antropojenik partiküller olduğunu göstermektedir.

3.2. Nehirlerin Rolü: Karasal Kaynakların Denizlere Ana Taşıyıcısı

Karasal faaliyetlerden kaynaklanan plastik kirlilik, özellikle yoğun nüfuslu ve endüstriyel bölgelerde nehirler aracılığıyla büyük miktarlarda deniz ortamına taşınmaktadır. Çalışmalar karasal plastik atıkların önemli bir bölümünün doğrudan veya dolaylı olarak nehirler yoluyla denizlere ulaştığını vurgulamıştır (Jambeck vd., 2015).

3.2.1. Türkiye'nin Akdeniz Nehirleri Üzerinden Taşınan Mikropplastikler

Doğu Akdeniz'de yapılan çalışmalar, Türkiye kıyılarının nehir kaynaklı MP taşıyımına özellikle duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Mersin Körfezi, bu açıdan en yoğun baskı altındaki bölgelerden biridir. Bölgeye dökülen nehirlerin toplam yıllık mikropplastik yükünün 1.2×10^{12} parçacığa ulaştığını rapor edilmiştir (Özgüler, vd., 2022). Bu değer, Akdeniz'in doğu kıyılarında birikimin neden bu kadar yüksek olduğunu açıklayan önemli bir göstergedir.

Yüzey suyu örneklemelerinde:

- Körfez genelinde 0.22–0.68 adet/m² arasında değişen mikropplastik yoğunlukları,
- Seyhan Nehri ağzında ise istasyonlardan birinde 906 parçaya ulaşan ekstrem değerler

Şema (şekil 2), kentsel ve endüstriyel alanlardan kaynaklanan plastiklerin yüzey akışı, endüstriyel deşarj ve doğrudan giriş yoluyla nehir sistemine ulaştığını; oradan da sedimanlar, tarım toprakları ve okyanusa taşındığını göstermektedir. Atıksu arıtma tesisleri hem plastiklerin bir kısmını tutan hem de arıtma çamuru yoluyla karasal ekosistemlere yeniden dağıtılmasına neden olan önemli bir ara nokta olarak modellenmiştir. Toprak erozyonu, sel taşkını ve nehir taşınımı gibi süreçler plastik döngüsünü pekiştirerek karasal ve sucul ortamlar arasında sürekli bir akış oluşturur.

3.4. Okyanus Sirkülasyonu: Dağılım, Yoğunlaşma Bölgeleri ve Sedimentasyon

Okyanus sirkülasyonu, denizlerdeki MP dağılımını belirleyen ana fiziksel mekanizmalardan biridir. Araştırmalar Akdeniz’de yüzey akıntılarının plastikleri belirli bölgelerde yoğunlaştırdığını ve bu nedenle havzanın dünya okyanusları arasında “plastik çorbası” olarak tanımlanacak kadar yüksek kirlilik seviyelerine ulaştığını göstermiştir (Suaria, G vd., 2016).

3.4.1. Yüzey Akıntılarının Etkisi

Polietilen (PE) ve polipropilen (PP) gibi düşük yoğunluklu polimerler akıntılar tarafından taşınarak geniş mesafelere yayılmaktadır. Yarı kapalı bir sistem olan Akdeniz’de su yenilenme kapasitesinin düşük olması, bu tür mikroplastiklerin uzun süre yüzeyde kalmasına neden olmaktadır.

3.4.2. Biyofilm Oluşumu ve Batma Eğilimi

Plastik yüzeylerinde biyofilm oluşması ve bu biyofilmlerin zamanla plastik parçacıkların yoğunluğunu artırarak su kolonunda batma eğilimini değiştirdiğini gösteren çalışmalar yapılmıştır (Zettler vd., 2013). Bu nedenle başlangıçta yüzeyde kalması beklenen PE gibi polimerler, birkaç hafta içinde sedimanlara çöker hale gelebilmektedir.

3.4.3. Sedimentlerde Birikim

PET ve PVC gibi yüksek yoğunluklu polimerler, üretim özellikleri gereği doğrudan su kolonunun alt kesimlerine çöker. Akdeniz çukur bölgelerinde MP yoğunluğunun yüzey sularına kıyasla daha yüksek olması ve sedimanların mikroplastiklerin nihai birikim alanları olduğunu açıkça ortaya koyan çalışmalar mevcuttur (Suaria vd., 2016).

3.5. Akdeniz’in Mikroplastik Birikimi Açısından Küresel Bir Sıcak Nokta Olması

Akdeniz Havzası, dünya genelinde en yüksek mikroplastik yoğunluklarının rapor edildiği bölgelerden biridir. Bunun temel nedenleri:

- Yarı kapalı coğrafi yapı,

- Yüksek nüfus yoğunluğu,
- Turizm baskısı,
- Plastik atık yönetimindeki yetersizlikler,
- Nehir kaynaklı yoğun MP girdisi,
- Sınırlı su yenilenme kapasitesi

olarak sıralanabilir.

Çalışmalar Akdeniz yüzey sularında 0.4–12.6 parçacık/m³ aralığında değişen mikroplastik yoğunlukları rapor etmiş ve bu seviyelerin Pasifik ve Atlantik'teki çöp yığınlarıyla karşılaştırılabilir olduğunu göstermiştir (Suaria vd., 2016).

Bu veriler, Akdeniz'i mikroplastik birikimi açısından küresel bir hotspot konumuna taşımaktadır.

4. Mikroplastiklerin Deniz Ekosistemlerinde Dağılımı

Mikroplastiklerin (MP) deniz ortamındaki dağılımı, fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçlerin bir arada işlediği çok yönlü bir dinamiğe sahiptir. mikroplastiklerin farklı polimer türleri, yoğunluk özellikleri, su kolonundaki hareketleri ve sedimana çökme davranışları, deniz ekosistemlerinde heterojen bir dağılım oluşturur. Bu bölümde su kolonu, yüzey suları, kıyı bölgeleri ve derin deniz sedimanlarında mikroplastiklerin mekânsal desenleri incelenmekte ve özellikle Akdeniz ile Türkiye kıyılarına ilişkin mevcut literatürden edinilen bulgular değerlendirilmektedir.

4.1. Su Kolonunda Mikroplastik Dağılımı

Su kolonunda mikroplastiklerin dağılımı büyük ölçüde polimer yoğunluğu, biyofilm oluşumu, akıntılar ve türbülans gibi faktörlere bağlıdır. Düşük yoğunluklu polimerler (ör. PE, PP) başlangıçta yüzey sularında yoğunlaşırken, PET ve PVC gibi daha yüksek yoğunluklu polimerler su kolonunun alt katmanlarına doğru çökme eğilimindedir (Barboza vd., 2018).

Çalışmalar fotodegradasyon ve mekanik aşınma süreçlerinin mikroplastiklerin su kolonunda daha küçük fraksiyonlara ayrılarak askıda kalma süresini uzattığını ve su yüzeyi–orta tabaka–sediman arasındaki geçişin sürekli bir döngü şeklinde işlediğini belirtmektedir. Bu nedenle su kolonu, mikroplastiklerin hem taşındığı hem de zaman içinde dönüşüme uğradığı dinamik bir ortam niteliğindedir (Andrady 2011).

Su kolonu boyunca dağılımı belirleyen bir diğer önemli mekanizma biyofilm gelişimidir. Mikroplastik yüzeylerinde gelişen mikrobiyal toplulukların yoğunluk artışına neden olduğu ve bu durumun plastiklerin zamanla batmasına yol açtığı

çalışmalarda gösterilmiştir (Zettler, E. R. vd., 2013). Byylece başlangıçta yüzeyde yer alan mikroplastikler, su kolonunun daha alt tabakalarına taşınarak sediman birikim sürecine dâhil olmaktadır.

4.2. Yüzey Sularında Mikroplastik Birikimi

Deniz yüzeyleri, düşük yoğunluklu polimerlerin yanı sıra atmosferik taşınım, nehir kaynaklı girişler ve kıyısız insan faaliyetleri nedeniyle mikroplastik kirliliğinin en yoğun gözlendiği bölgeler arasındadır. Akdeniz yüzey sularında 0.4–12.6 parçacık/m³ arasında değişen mikroplastik yoğunlukları rapor edilmiş ve bu değerlerin dünya denizlerindeki en yüksek yoğunluklar arasında yer aldığı ortaya koyulmuştur (Suaria vd., 2016).

Türkiye kıyılarında yürütülen çalışmalar da benzer şekilde yüksek yüzey MP birikimini doğrulamaktadır. Doğu Akdeniz kıyılarında gerçekleştirilen yüzey örneklemelerinde 0.22–0.68 adet/m² yoğunluğunda MP parçacıkları tespit edilmiştir (Gündoğdu, S., & evik, C. 2017). Bu birikimin, hem bölgedeki yoğun kıyı nüfusu hem de plastik tkretim baskısı ile ilişkili olduğu belirtilmektedir.

Ayrıca atmosferik çökelme, kıyı bölgelerinde yüzey MP yoğunluğunu artıran tamamlayıcı bir mekanizma olarak öne çıkılmaktadır. Tekstil lifleri ve toz partiküllerinin atmosfer yoluyla deniz yüzeyine taşınmasının uzun menzilli bir kirlilik rotası oluşturduğu vurgulanmaktadır (Horton & Dixon 2018).

4.3. Sahil şeritleri ve Kıyı Bölgelerinde Mikroplastik Dağılımı

Kıyı bölgeleri, hem karasal hem de denizel kaynaklardan gelen mikroplastiklerin keşiştiği alanlar olduğu için MP yoğunluğunun en yüksek gözlendiği ekosistemlerden biridir. Sahil kumları, dalga enerjisi, sediment birikimi ve rüzgâr hareketi nedeniyle mikroplastiklerin kolayca tutulabildiği bir matris oluşturur.

Türkiye'nin çeşitli kıyı bölgelerini kapsayan çalışmalarda, sahil sedimanlarında film, lif ve fragman formundaki mikroplastiklerin baskın olduğu belirtilmiş ve özellikle yoğun turizm bölgelerinde tüketiciler plastiklerinin belirgin şekilde arttığı gösterilmiştir (evik vd., 2021).

Tarımda kullanılan plastik malların parçalanması da kıyı bölgelerinde gözlenen film tipi mikroplastiklerin önemli bir kaynağıdır (Gündoğdu vd., 2017). Sahil bölgelerinde özellikle şeffaf, ince film formundaki polimerlerin yoğun görülmesi, çiftçilik ve seracılık uygulamalarının bölgesel MP profilini şekillendirdiğini göstermektedir.

4.4. Deniz Sedimanlarında Mikroplastik Birikimi

Sedimanlar, mikroplastiklerin deniz ekosistemlerindeki nihai birikim alanıdır. Yüzeyde başlayan birikim süreci, biyofilm oluşumu, yoğunluk artışı, flokülasyon ve yerkimi etkisiyle zamanla sedimanlara doğru ilerler (Zettler vd., 2013). Bu

nedenle sedimanlardaki MP yoğunluğu, çoğu zaman yüzey sularından daha yüksek bulunur.

Mersin Körfezi'nde nehir ağızlarına yakın sedimanlarda yüksek miktarda mikroplastik birikimi tespit edilmiş ve bu durumun nehir kaynaklı taşınımın sediman birikimini doğrudan etkilediği ortaya konmuştur (Özgüler vd., 2022). Sedimanlarda en sık görülen polimer türleri genellikle PE, PP ve PET olup, bu türlerin bölgesel kullanım alışkanlıklarını yansıttığı düşünülmektedir.

Akdeniz genelinde değerlendirildiğinde, havzanın derin bölgelerinde yüksek mikroplastik konsantrasyonları bulundurduğu ve Akdeniz çukurlarının plastiklerin uzun vadeli depolama alanlarına dönüştüğü belirtilmiştir (Suaria vd., 2016). Bu durum, yarı kapalı havza yapısı ve düşük su yenilenme oranı ile birlikte ele alındığında Akdeniz sedimanlarının küresel ölçekte kritik bir mikroplastik rezervuarı haline geldiğini göstermektedir.

4.5. Akdeniz ve Türkiye Özelinde Dağılımın Bölgesel Önemi

Türkiye kıyıları, Akdeniz'in mikroplastik birikimi açısından en hassas bölgelerinden biridir. Hem nehir girdilerinin yoğunluğu hem de kıyı yerleşimlerinin baskısı, sahil-yüzey suyu-sediman ekseninde belirgin bir mikroplastik dağılım paterni oluşturmaktadır. Rapor edilen bulgular, Doğu Akdeniz'in mikroplastiklerin birikim, taşınım ve sedimanlaşma süreçlerinde kilit bir bölge olduğunu kanıtlamaktadır (Özgüler, vd., 2022).

Bu yoğunluğun temel sebepleri:

- Yarı kapalı havza yapısı,
- Sınırlı su yenilenme kapasitesi,
- Akdeniz'in dünya turizmi içindeki payının yüksek olması,
- Nehir taşınımının güçlü olması,
- Bölgesel plastik tüketim tarzları

şeklinde sıralanabilir.

Bu nedenle Akdeniz, mikroplastik dağılımı açısından hem küresel bir sıcak nokta hem de bölgesel ekolojik risklerin kesişim noktasıdır.

5. Ekolojik Etkiler: Zooplanktondan Balıklara Trofik Transfer

Mikroplastiklerin (MP) deniz ekosistemleri üzerindeki ekolojik etkileri çok ölçekli ve çok katmanlı bir yapıya sahiptir. Zooplankton düzeyinde başlayan bu etkiler, balıklara, kabuklulara ve nihayetinde üst trofik seviyelere kadar ilerleyerek hem ekosistem bütünlüğünü hem de insan besin zincirini etkilemektedir. Güncel çalışmalar, mikroplastiklerin yalnızca fiziksel değil aynı zamanda kimyasal ve biyolojik etkilerinin de geniş kapsamlı olduğunu ortaya

koymaktadır (Wright et vd., 2013; Barboza vd., 2018). Bu bölümde mikroplastiklerin farklı trofik seviyelerde yol açtığı ekolojik sonuçlar, literatürdeki kanıtlar ışığında ele alınmaktadır.

5.1. Zooplanktonda Mikroplastik Alımı ve İlk Basamak Etkiler

Zooplankton, deniz ekosistemlerinde besin ağının temelini oluşturan kritik bir trofik bileşendir. Bu nedenle mikroplastiklerin ekosisteme girişindeki ilk basamaklardan biridir. Laboratuvar koşullarında kopepodların farklı boyut ve polimer türlerindeki mikroplastikleri aktif olarak yutabileceğini gösterilmiştir (Cole, M., vd., 2013). Bu çalışmalar, zooplanktonların mikroplastikleri çoğu zaman fitoplanktonla benzer boyut-tanecik özellikleri nedeniyle ayırt edemediğini ortaya koymaktadır.

Mikroplastik alımının zooplankton üzerindeki olası etkileri:

- Beslenme oranlarında azalma,
- Enerji kaybı ve metabolik stres,
- Reprodüksiyon kapasitesinde düşme,
- Dışkı peletlerinin yoğunluk ve batma hızında değişim,

şeklinde özetlenebilir (Cole vd., 2013; Wright vd., 2013). Zooplanktonun beslenme bozukluğuna uğraması, besin ağının bütün trofik yapısını zincirleme etkileyen önemli bir ekolojik risktir.

5.2. Bentik ve Pelajik Organizmalarda Birikim

Mikroplastiklerin hem pelajik (açık su) hem de bentik (deniz tabanı) organizmalarda tespit edildiği bilinmektedir. Özellikle filtreleyici türlerin (ör. midyeler) su kolonundaki mikroplastikleri yüksek verimlilikle süzdüğünü ve bünyelerinde biriktirdiğini çalışmalarda gösterilmiştir (Barboza vd., 2018). Filter-feeders, hem kirleticilere yüksek maruziyet gösterir hem de tropik ağda önemli bir bağlantı noktası olduğundan ekosistem riskini artıran türlerdir.

Bentik türlerde ise MP birikimi genellikle sediman kaynaklıdır. Sedimana çöken PE, PP ve PET parçacıkları deniz tabanı organizmaları tarafından doğrudan yutulabilir veya besin yoluyla dolaylı maruziyet gerçekleşebilir (Özgüler vd., 2022).

Mikroplastiklerin bentik organizmalarda yol açtığı etkiler:

- Sindirim sistemi tıkanmaları,
- Enerji dağılımında değişiklikler,
- Büyüme ve gelişme hızında azalma,
- Doku hasarı ve oksidatif stres

olarak bildirilmektedir (Wright vd., 2013; Barboza vd., 2018).

5.3. Balıklarda Mikroplastik Alımı ve Fizyolojik Etkiler

Ticari öneme sahip birçok balık türünde hem bağırsak hem de solungaç dokularında mikroplastik tespit edilmiştir. Güney Çin Denizi'nde yapılan çalışmalarda balık türlerinde mikroplastiklere ek olarak mikroplastiklere adsorbe olmuş kimyasallar da tanımlanmış ve bu birleşik maruziyetin toksikolojik riskini artırdığını belirtmiştir (Barboza vd., 2018). Mikroplastiklerin hidrofobik yüzeyleri, pestisitler, ağır metaller ve kalıcı organik kirleticilerin (POPs) kolayca adsorbe olmasına neden olur; bu durum balık dokularında kimyasal yükün artmasına yol açmaktadır.

Balıklarda gözlenen fizyolojik etkiler arasında:

- Bağırsak epitelinde mekanik hasar,
- Solungaç fonksiyonlarında bozulma,
- Oksidatif stres ve inflamasyon,
- Enerji metabolizmasının değişimi,
- İmmün sistem baskılanması

bulunmaktadır (Wright vd., 2013; Barboza vd., 2018).

Bu etkiler hem vahşi popülasyonların sürdürülebilirliği hem de insan tüketimine sunulan deniz ürünlerinin güvenliği açısından kritik önem taşımaktadır.

5.4. Kimyasal Kirleticilerin Mikroplastikler Üzerinde Taşınması

Mikroplastikler yalnızca fiziksel zararlara neden olmakla kalmaz, aynı zamanda çevresel kirleticiler için taşıyıcı yüzey (vector) görevi görürler. Bu süreç, hem kimyasal maruziyeti hem de ekotoksikolojik riskleri artırır. mikroplastiklerin hidrofobik yapıları sayesinde PCB, PAH, pestisitler ve ağır metaller gibi toksik maddeleri yüzeylerinde tutunabildiği ve besin zincirine aktarılabilirdiği bilinmektedir (Barboza vd., 2018).

Bu taşınım mekanizması şu sonuçlara yol açabilir:

- Organizmada daha yüksek kimyasal yük,
- Biyobirikim ve biyomagnifikasyon,
- Uzun vadeli toksik etki potansiyeli,
- İnsanlara kadar uzanan maruziyet zinciri.

Balık dokularında mikroplastiklerle birlikte farmasötik kalıntılar dâhil yeni nesil kirleticilerin de tespit edilmesinin, MP–kirletici etkileşiminin çok boyutlu olduğunu doğruladığını vurgulayan çalışmalar mevcuttur (Yu vd., 2024).

5.5. Trofik Transfer: Besin Zincirinde Mikroplastik Akışı

Zooplankton–balık–üst tüketiciler şeklindeki klasik denizel besin zinciri, mikroplastik taşınımı açısından ideal bir aktarım yoludur. Mikroplastiklerin trofik seviyeler arasında taşınmasının hem laboratuvar hem de saha çalışmalarıyla doğrulandığı belirtilmektedir (Dulta vd., 2025). mikroplastiklerin daha küçük boyutları (özellikle $<100\ \mu\text{m}$) trofik transferi kolaylaştıran temel faktördür.

Trofik transferin ekolojik sonuçları:

- mikroplastiklerin giderek daha büyük organizmalara geçmesi,
- Kimyasal kirletici yükünün trofik seviyelerde artması,
- Enerji verimliliğinin düşmesi,
- Uzun ömürlü türlerde biyobirikim nedeniyle kalıcı toksisite riskinin artması,
- Balıkçılık ve gıda güvenliğine yönelik tehditlerin büyümesi.

Bu süreç ekosistemin tamamında bir kümülatif stres yaratmakta ve insan sağlığına kadar uzanan geniş kapsamlı etkiler doğurmaktadır (Barboza vd., 2018; Yu vd., 2024).

5.6. Ekosistem Düzeyinde Sonuçlar

Mevcut araştırmalar, mikroplastiklerin deniz ekosistemlerinde hem doğrudan hem de dolaylı olarak çeşitli ekolojik fonksiyonları etkileyebileceğini göstermektedir. Bu etkiler arasında:

- Birincil üretimin dolaylı bozulması (zooplankton baskılanması),
- Besin ağlarında verim düşüşü,
- Habitat fonksiyonlarında değişiklik,
- Balık ve kabuklu popülasyonlarında uzun vadeli düşüş,
- Ekosistem dayanıklılığının azalması

bulunmaktadır (Wright vd., 2013; Barboza vd., 2018).

Bu bağlamda mikroplastikler, yalnızca bir “çevresel kirletici” değil, aynı zamanda ekosistem fonksiyonlarını yeniden şekillendiren bir stres faktörü olarak ele alınmalıdır.

6. Plastisfer ve Mikrobiyal Topluluklar

Mikroplastikler deniz ortamında yalnızca fiziksel bir kirletici olarak kalmaz; zamanla üzerlerinde karmaşık mikrobiyal toplulukların gelişmesiyle yeni bir ekolojik niş oluştururlar. Bu yapıya literatürde “Plastisfer” adı verilir ve ilk kez

Zettler, Mincer ve Amaral-Zettler (2013) tarafından tanımlanmıştır. Plastisfer, deniz suyundan taksonomik olarak farklılaşmış bakteri, mantar, alg ve protist topluluklarının plastik yüzeylerinde kolonileşmesiyle oluşan özgün bir mikrohabitatı ifade eder. Bu bölüm, plastisferin oluşumu, ekolojik önemi, patojen taşınımı ve küresel biyogüvenlik açısından risklerini kapsamlı şekilde ele almaktadır.

6.1. Plastisferin Oluşumu: Biyofilm Temelli Yeni Bir Habitat

Mikroplastikler deniz ortamına girdikten kısa bir süre sonra yüzeylerinde organik maddelerin adsorpsiyonu ile başlayan biyofilm oluşumu, plastisfer gelişiminin ilk adımıdır. Biyofilmlerin zaman içinde sürekli büyüyerek plastik yüzeyi tamamen kapladığı, böylece polimer yüzeyinin fiziksel ve kimyasal özelliklerini önemli ölçüde değiştirdiğini belirten araştırmalar mevcuttur (Zettler vd., 2013).

Biyofilm gelişimini destekleyen başlıca faktörler:

- Plastik yüzeyinin hidrofobik yapısı,
- Düşük yoğunluklu polimerlerin yüzey su tabakalarında daha fazla zaman geçirmesi,
- Deniz suyundaki çözünmüş organik maddelerin adsorpsiyonu,
- UV ve sıcaklık değişimlerinin mikroorganizmalar için yeni mikrohabitatlar oluşturmaları.

Bu süreç sonunda mikroplastik parçacıkları, çevresel sudan farklı mikrobiyal profillere sahip, yapay bir yüzer substrat hâline dönüşür. Çalışmalar plastisferde tespit ettikleri taksonomik grupların çevresel sudan önemli farklılıklar gösterdiğini vurgulayarak, plastik yüzeylerinin benzersiz ekolojik özelliklere sahip olduğunu ortaya koymuştur (Zettler vd., 2013).

6.2. Plastisferde Bulunan Mikrobiyal Toplulukların Ekolojik Rolü

Plastisferde yer alan mikroorganizmalar yalnızca pasif kolonizatörler değildir; aynı zamanda deniz ekosistemlerinde çeşitli işlevlere sahiptir:

- Organik madde dönüşümü: Plastik yüzeylerinde biriken organik maddelerin parçalanması,
- Azot ve karbon döngüsüne katkı,
- Biyofilm matrisinin stabilizasyonu,
- Diğer mikroorganizmalar için habitat yaratılması.

Bazı çalışmalar, plastisferde bulunan bakterilerin polimer yüzeylerinde biyolojik aşınmaya yol açarak plastiklerin parçalanma hızını etkileyebileceğini

öne sürmüştür (Zettler vd., 2013). Bu durum hem mikroplastik döngüsünü hem de ekosistem dinamiklerini etkileyebilecek bir mekanizmadır.

6.3. Patojen Taşınımı: Mikroplastiklerin Rolü

Plastisferin en kritik unsurlarından biri, potansiyel patojen bakteriler için bir vektör görevi görebilmesidir. Mikroplastiklerin özellikle antimikrobiyal direnç genleri (AMR) taşıyan bakterilerin küresel ölçekte yayılmasında okyanus otostopçuları işlevi görebilecek vurgulamaktadır (Queiroga vd., 2025).

Bu çalışma, mikroplastikler üzerinde taşınan bakterilerin:

- Direnç genleri taşıyabileceğini,
- Farklı coğrafyalara uzun mesafeli taşınabileceğini,
- Balıklar ve diğer deniz canlılarıyla temas ederek yeni ortamlara geçebileceğini,
- İnsan sağlığına yönelik risk oluşturabileceğini

ortaya koymaktadır (Queiroga vd., 2025).

Plastisferde en sık tespit edilen potansiyel patojenlerden bazıları:

- *Vibrio spp.* (özellikle *V. cholerae* ve *V. parahaemolyticus*),
- *Escherichia coli*,
- *Staphylococcus spp.*,
- *Pseudomonas spp.*

gibi türlerdir. Bu taksonlar, hem deniz ekosistemlerinde hastalık yapıcı potansiyelleri hem de insanlara geçiş riski nedeniyle önem taşır.

6.4. Antimikrobiyal Direnç (AMR) Yayılımı ve Küresel Biyogüvenlik Tehlikesi

Plastisferin biyogüvenlik açısından en kaygı verici yönlerinden biri, antimikrobiyal direnç genlerinin taşınmasına aracılık edebilmesidir. Mikroplastiklerin bakteriler arasında yatay gen transferi için uygun bir ortam sunduğu ve bu durumun direnç genlerinin hızlı şekilde yayılmasına olanak tanıdığı gösterilmiştir (Queiroga vd., 2025).

Bu süreç şu riskleri doğurmaktadır:

- AMR genlerinin deniz ortamında hızlı yayılması,
- Balık, kabuklu ve diğer deniz canlılarında dirençli bakterilerin oluşması,
- Mikroplastiklerin besin zinciri yoluyla insanlara potansiyel risk taşıması,

- Hastalıkların kontrol edilebilirliğinin azalması,
- Tek Sağlık kapsamında yeni biyogüvenlik tehditlerinin ortaya çıkması.

Bu bulgular, mikroplastiklerin yalnızca çevresel bir kirletici değil, aynı zamanda hastalık ve direnç genlerinin taşınmasında jeokimyasal bir vektör olduğunu ortaya koymaktadır.

6.5. Plastisferin Ekosistemler Arası Taşınımında Rolü

Plastisfer, mikroplastiklerin su kolonunda askıda kalmasını kolaylaştıran biyofilmler ile birlikte parçacık davranışını değiştirir. Biyofilmlerin MP yoğunluğunu artırarak parçacıkların daha hızlı batmasına neden olabileceği belirtilmiştir (Zettler vd., 2013). Bu durum, mikroplastiklerin su yüzeyinden sedimana doğru taşınmasını hızlandırabilir.

Aynı zamanda plastisferde yer alan mikroorganizmalar, türlerin ekosistemler arası taşınması açısından da önemlidir. Bir kıyıdan ayrılan plastik parçacığı, yüzlerce kilometre yol alarak yeni habitatlara mikrobiyal topluluklar taşıyabilmektedir. Bu durum:

- İstilacı türlerin yayılımını,
- Hastalık taşıyıcılarının coğrafi genişlemesini,
- Ekosistem dengelerinde bozulmayı

beraberinde getirebilir (Queiroga vd., 2025).

7. İnsan Sağlığı Üzerindeki Tehdit: Maruziyet Yolları ve Toksisite

Mikroplastiklerin (MP) deniz ekosistemlerindeki yaygınlığı, yalnızca ekolojik sistemi değil, aynı zamanda insan sağlığını da doğrudan etkileyen bir soruna dönüşmüştür. Deniz ürünleri tüketimi, içme suyu, tuz, atmosferik soluma ve gıda zinciri üzerinden gerçekleşen çoklu maruziyet yolları nedeniyle insanlar artık mikroplastik kirliliğinin nihai alıcılarından biridir. Güncel bilimsel bulgular, mikroplastiklerin insan dokularına kadar ulaşabildiğini ve biyolojik etkilerinin düşündüğümüzden çok daha karmaşık olduğunu göstermektedir (Leslie vd., 2022; Barboza vd., 2018). Bu bölümde mikroplastiklerin insanlara ulaşma yolları, fizyolojik etkileri ve potansiyel sağlık riskleri, mevcut literatür doğrultusunda kapsamlı biçimde değerlendirilmektedir.

7.1. Deniz Ürünleri Tüketimi Yoluyla Maruziyet

İnsanların mikroplastiklere en sık maruz kaldığı yol, deniz ürünleri tüketimidir. Özellikle balıklar, kabuklular ve midyeler, besin alma biçimleri nedeniyle mikroplastik birikimine daha yatkın türlerdir. Deniz ürünlerinde görülen mikroplastiklerin çoğunun trofik transfer yoluyla ekosistem içinden geldiği ve bu partiküllerin tüketici tarafından doğrudan alınabileceği belirtilmektedir (Dulta vd., 2025).

Filtreleyici organizmaların (özellikle midyelerin) yüksek düzeyde mikroplastik süzdüğü ve bu türlerin bütün halde tüketilmesi nedeniyle insan maruziyetinde kritik bir rol oynadığı vurgulanmaktadır (Barboza vd., 2018). Midye ve istiridyelerde tespit edilen mikroplastiklerin çoğu lif, fragman ve film formunda olup, polimer kompozisyonları bölgesel kirlilik profiline doğrudan bağlıdır.

Güney Çin Denizi'nden yakalanan balıklarda mikroplastiklere ek olarak mikroplastiklere adsorbe olmuş farmasötik kalıntılar, endokrin bozucu maddeler ve ağır metaller tespit edilmiş; bu kombinasyonun insan tüketimi açısından çift yönlü risk yarattığı gösterilmiştir (Yu vd., 2024).

7.2. İçme Suyu, Sofra Tuzu ve İşlenmiş Gıdalar Yoluyla Maruziyet

Deniz ürünleri dışında mikroplastiklerin insanlara ulaştığı diğer önemli yollar:

- İçme suyu (şebeke ve şişelenmiş su),
- Sofra tuzu,
- İşlenmiş gıdalar.

Türkiye’de yapılan araştırmalar, özellikle tuz ve içme sularında mikroplastik varlığını doğrulamıştır. Türkiye’de tuz ve gıdalarda tespit edilen mikroplastiklerin çoğunun tekstil kökenli lifler veya küçük film parçaları olduğu bildirilmiştir (Soysal, M., 2024). Bu bulgular, yalnızca deniz ürünü tüketiminin değil, günlük yaşamda maruz kalınan temel gıdaların da mikroplastik taşıyıcısı haline geldiğini göstermektedir.

Bu nedenle mikroplastik maruziyeti artık yüksek risk grupları ile sınırlı değil; toplumun tüm kesimlerini etkileyen yaygın bir halk sağlığı problemidir.

7.3. Atmosferik Soluma Yoluyla Mikroplastik Alımı

Atmosferdeki mikroplastik lif ve parçacıkların rüzgâr taşınımı, tekstil aşınması ve lastik partikülleri nedeniyle havaya karıştığı ve bu parçacıkların insanların solunum yolu ile vücuda girebildiği belirtilmektedir (Horton, A. A., & Dixon, S. J., 2018). Solunan mikroplastiklerin boyutuna bağlı olarak:

- Üst solunum yollarında tutulabildiği,
- Akciğer alveollerine ulaşabildiği,
- Solunum yolu iltihabı ve doku hasarı oluşturabileceği öngörülmektedir.

Bu maruziyet, özellikle yoğun nüfuslu şehirlerde, kapalı ortamlarda çalışanlarda ve endüstriyel alanlara yakın yaşayan bireylerde daha yüksek olabilir.

7.4. Mikroplastiklerin İnsan Kanı ve Dokularında Tespit Edilmesi

İnsan sağlığı açısından en çarpıcı bulgulardan biri, mikroplastiklerin doğrudan insan vücudu içinde tespit edilmesidir. Sağlıklı bireylerin kan örneklerinde PET, polietilen ve polistiren dahil olmak üzere çeşitli polimerlerin bulunduğu ve ortalama MP konsantrasyonunun 1.6 µg/mL seviyesinde olduğu rapor edilmiştir (Leslie vd., 2022). Bu çalışma, mikroplastiklerin bağırsak bariyerini aşabileceğini ve sistemik dolaşıma girebileceğini kanıtlayan ilk araştırmalardan biridir.

Bu bulgu, daha önce yalnızca ekolojik maruziyet kapsamında değerlendirilen mikroplastiklerin artık doğrudan insan fizyolojisi ile etkileşime girdiğini göstermektedir.

7.5. Mikroplastik ve Nanoplastiklerin Toksik Etkileri

Mikroplastikler yalnızca fiziksel bir iritan değildir; aynı zamanda kimyasal ve biyolojik toksisiteyi tetikleyen çok yönlü bir stres faktörüdür. Özellikle nanoplastiklerin (<100 nm) hücresel membranları geçebildiği, oksidatif stres, inflamasyon ve sitotoksosite oluşturabildiği belirtilmiştir (Marcharla vd., 2024).

Mikroplastiklerin insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkileri:

- **Oksidatif stres:** Reaktif oksijen türlerinin (ROS) artışı, hücresel hasar.
- **Enflamasyon:** Bağışıklık sistemi aktivasyonunun kronikleşmesi.
- **Endokrin bozuculuk:** Kimyasal katkı maddelerinin hormon sistemine müdahalesi.
- **Sitotoksosite ve genotoksosite:** Hücre sağlığı üzerinde uzun vadeli etkiler.
- **Mikrobiyal disbiyozis:** Bağırsak mikrobiyotasının bozulması.

Ayrıca mikroplastiklerin taşıdığı toksik kimyasalların ve patojenlerin insanlarda uzun vadeli sağlık sorunlarına yol açabileceği vurgulanmaktadır (Dulta vd., 2025).

7.6. Besin Zinciri Yoluyla Biyobirikim ve İnsanlara Ulaşan Kümülatif Risk

Deniz ekosistemlerinde başlayan mikroplastik birikimi, besin zincirindeki her bir basamakta daha karmaşık bir maruziyet profiline dönüşür. Trofik transfer yoluyla insanlara ulaşan mikroplastiklerin aynı zamanda kimyasal kirleticileri de taşıyabileceği, bunun ise çoklu toksisite riskini artırdığı gösterilmektedir (Barboza vd., 2018).

Bu kümülatif riskin bileşenleri:

- MP + kimyasal kirletici kombinasyonu,

- MP + patojen kombinasyonu (plastisfer kaynaklı),
- MP + ağır metal adsorpsiyonu,
- Uzun vadeli biyobirikim potansiyeli.

Dolayısıyla mikroplastikler sadece mekanik bir kirlilik değildir; insan sağlığını etkileyen çoklu etki mekanizmalarına sahip hibrit bir kirleticisi olarak değerlendirilmelidir.

8. Mikroplastiklerin Yönetimi: İzleme, Arıtma Teknolojileri ve Politikalar

Mikroplastik (MP) kirliliği, küresel ölçekte hem ekolojik hem de halk sağlığı açısından ciddi bir tehdit olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle etkili yönetim stratejilerinin geliştirilmesi, mikroplastiklerin çevredeki yükünün azaltılması ve uzun vadeli sürdürülebilirlik hedeflerinin sağlanması açısından zorunludur. Son yıllarda yapılan çalışmalar, mikroplastiklerin kaynağında azaltılması, çevredeki dağılımının izlenmesi ve mevcut arıtma sistemlerinin iyileştirilmesi yönünde önemli bilimsel ve politik gelişmeler ortaya koymuştur (Geyer vd., 2017). Bu bölümde mikroplastik kirliliğinin yönetimine ilişkin izleme yöntemleri, arıtma teknolojileri ve politika yaklaşımları bütüncül bir çerçevede ele alınmaktadır.

8.1. Mikroplastiklerin İzlenmesi: Metodolojik Yaklaşımlar ve Zorluklar

Mikroplastiklerin çevresel ortamlarda doğru şekilde tespit edilmesi ve nicelenmesi, yönetim stratejilerinin temelini oluşturur. Ancak mikroplastikler; boyut, şekil, yoğunluk ve polimer türü bakımından büyük çeşitlilik gösterdiği için standart bir izleme yöntemi oluşturmak zordur. Türkiye ve Akdeniz Bölgesi üzerine yapılan çalışmalarda da bu farklılıklar nedeniyle sonuçlar arasında önemli varyasyonlar gözlenmiştir (Çevik vd., 2021).

Güncel izleme yöntemleri genellikle üç ana aşamadan oluşur: örnekleme, parçacık ayırma ve analitik karakterizasyon. Ayırma aşamasında yoğunluk farkına dayalı çöktürme yöntemleri; analizde ise FTIR ve Raman spektroskopisi sıkça kullanılmaktadır. Ancak özellikle küçük boyutlu (<100 µm) parçacıkların tespitinde hata payı yükselmektedir. Bu durum araştırmacıları daha duyarlı ve standartlaştırılmış metotlara yöneltmektedir (Soysal, 2024).

Ayrıca çevresel izleme yalnızca yüzey suları ile sınırlı değildir. Sediman, biyota ve atmosferik örneklerde de analitik çalışmalar yürütülmekte, ancak farklı matrisler ölçüm belirsizliklerini artırmaktadır. Bu nedenle uluslararası uyumlu protokoller geliştirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Horton & Dixon, 2018).

8.2. Atıksu Arıtma Tesislerinde Mikroplastik Giderimi

Atıksu arıtma tesisleri (AAT), mikroplastiklerin çevreye geçişinde hem bir kaynak hem de bir filtre görevi görmektedir. Birçok ülkede AAT çıkış sularında yüksek miktarda mikroplastik tespit edilmiş, bununla birlikte tesislerin mekanik ve biyolojik aşamalarının belirli oranlarda MP tutabildiği gösterilmiştir (Marcharla vd., 2024).

Fiziksel arıtma içinde yer alan ızgaralar ve çöktürme havuzları, özellikle büyük boyutlu (>1 mm) plastikleri tutmada etkiliyken, küçük parçacıkların büyük kısmı arıtmayı geçebilmektedir. Kimyasal arıtma aşamalarında flokülasyon ile MP gideriminin artırılabilceği bildirilmiştir. Buna karşın ince lif tipi mikroplastiklerin arıtma hatlarından kaçmakta daha dirençli olduğu görülmektedir (Anjum vd., 2023).

Arıtma sonrası oluşan çamur (atıksu çamuru) önemli bir başka sorundur. Mikroplastiklerin önemli bir bölümü bu çamura geçtiği için tarımsal amaçlı çamur kullanımında toprağa ek bir kirlilik girişi oluşmaktadır. Bu durum AAT'lerin mikroplastik yönetimindeki ikili rolünü ortaya koymakta ve çamur yönetim stratejilerinin gözden geçirilmesi gerektiğini göstermektedir (Chia vd., 2021).

8.3. Nehir ve Kıyı Sistemlerinde Yük Azaltımı

Nehirler, karasal kaynaklı mikroplastiklerin denizlere taşınmasında en önemli yollardan biridir. Mersin Körfezi üzerine yapılan araştırmalar, nehirlerin özellikle PP, PE ve PET türü plastikleri yoğun şekilde taşıdığını göstermiştir (Özgüler vd., 2022). Bu nedenle nehir ağızlarında mikroplastik kontrol sistemlerinin kurulması, yükün denize ulaşmadan azaltılmasını sağlayabilir.

Ayrıca kıyı bölgelerinde balıkçılık faaliyetlerinden kaynaklanan polistiren ve polipropilen kökenli plastikler önemli bir kirlilik kaynağıdır. Bu ekipmanların kaybolması veya denize bırakılması sonucunda oluşan plastik atıkların parçalanması, mikroplastik yükünü uzun vadede artırmaktadır (Gündoğdu & Çevik, 2017).

8.4. Teknolojik Çözümler: Nanoteknoloji ve Gelişmiş Filtrasyon Sistemleri

Son yıllarda mikroplastiklerin giderimi için nanoteknoloji temelli çözümler dikkat çekmektedir. Çeşitli nano-adsorbanların ve fotokatalitik materyallerin mikroplastik parçacıklarını yüzeye bağlayarak uzaklaştırabildiği bildirilmiştir (Marcharla vd., 2024). Bu yöntemler özellikle çok küçük (<20 µm) parçacıkların tutulmasında büyük potansiyel taşımaktadır.

Ayrıca gelişmiş membran teknolojileri, ultrafiltrasyon ve ters ozmoz sistemleri de mikroplastik giderimi açısından etkili görünmektedir. Ancak bu sistemlerin enerji maliyetlerinin yüksek olması, yaygın kullanımını sınırlamaktadır (Anjum vd., 2023).

8.5. Politikalar ve Uluslararası Düzenlemeler

Mikroplastik kirliliğinin yönetiminde bilimsel veriler kadar politik mekanizmalar da belirleyici rol oynamaktadır. Plastik üretiminin 1950'lerden bu yana sürekli artış göstermesi ve küresel ölçekte 8.3 milyar tonun üzerine çıkması, politika müdahalelerinin zorunluluğunu ortaya koymuştur (Geyer vd., 2017).

Başlıca politika ve düzenleme alanları:

- Tek kullanımlık plastiklerin yasaklanması,
- Mikroboncukların kozmetik ürünlerde kullanımının sınırlandırılması,
- Geri dönüşüm sistemlerinin iyileştirilmesi,
- Kıyı bölgelerinde atık yönetim altyapısının güçlendirilmesi,
- Balıkçılık ekipmanlarının izlenebilirliğinin artırılması.

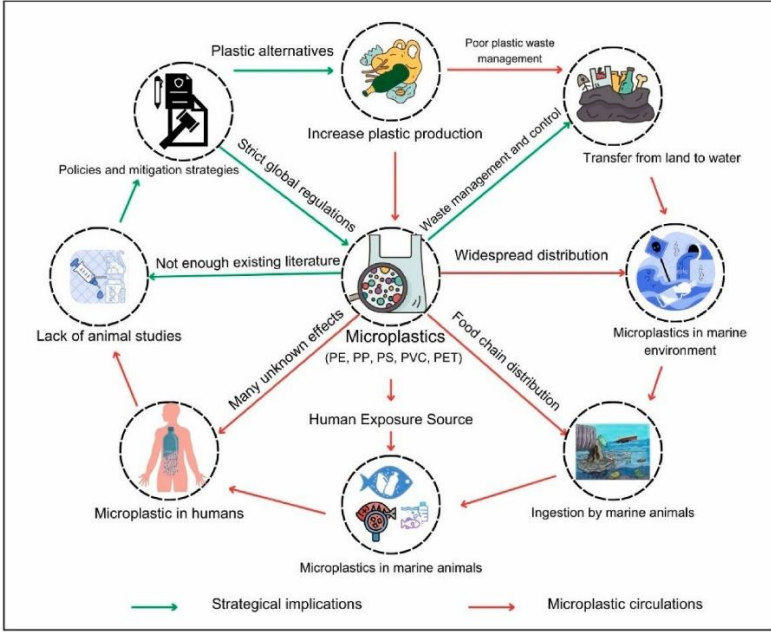
Ayrıca sürdürülebilir plastik üretime yönelik döngüsel ekonomi modelleri, atığın kaynağında azaltılmasını hedefleyen stratejiler arasında önemli yer tutmaktadır (Mihai vd., 2022).

Uluslararası düzeyde ise UNEP, Avrupa Birliği ve G20'nin yürüttüğü programlar, mikroplastik kirliliğinin sınır ötesi niteliği nedeniyle küresel koordinasyonun zorunlu olduğunu vurgulamaktadır.

9. Gelecek Perspektifi ve Sonuç

Mikroplastik kirliliği hem bilimsel hem de politik düzeyde giderek daha fazla dikkate alınan, küresel ölçekte çok boyutlu bir çevresel sorun haline gelmiştir. Plastikler kullanım sürecini tamamladıktan sonra çevrede yüzyıllarca bozulmadan kalabilmekte, fiziksel, kimyasal ve biyolojik etkileşimler sonucunda mikroplastiklere dönüşerek ekosistem döngülerinin ayrılmaz bir parçası olmaktadır. Bu nedenle mikroplastiklerin gelecekte oluşturacağı etkiyi anlamak, yalnızca güncel durumu değerlendirmekle değil, aynı zamanda uzun vadeli ekolojik, toksikolojik ve sosyoekonomik riskleri öngörmekle mümkündür (Geyer vd., 2017).

Aşağıdaki şema (şekil 3), mikroplastiklerin üretim aşamasından çevreye yayılımına, denizel ekosistemlerdeki dolaşımına ve en sonunda insan maruziyetine kadar uzanan bütüncül bir etkileşim ağını özetlemektedir. Ayrıca mikroplastik kirliliğini azaltmaya yönelik stratejik müdahaleler de gösterilmektedir.



Şekil 3. Mikroplastiklerin dağılımı ve ekolojik etkileri.

Mikroplastiklerin hem karasal hem de denizel sistemlerdeki dolaşımını; plastik üretimindeki artış, yetersiz atık yönetimi ve deniz ortamında geniş çaplı dağılım gibi süreçleri ilişkilendirerek göstermektedir. Mikroplastiklerin besin zincirine girişi ve deniz canlılarında birikimi sonucunda insanların da bu kirleticilere maruz kalabileceği vurgulanmaktadır. Stratejik müdahaleler (küresel düzenlemeler, plastik alternatifleri, politika uygulamaları) ise kirliliğin azaltılması için kritik önlemler olarak sunulmaktadır.

Gelecek yıllarda mikroplastik araştırmalarının daha çok nanoplastik boyutuna, insan sağlığı üzerindeki sistemik etkilere ve plastisfer kaynaklı patojen taşınımı gibi yeni ortaya çıkan risklere odaklanacağı öngörülmektedir. Nanoplastiklerin biyolojik bariyerleri aşma potansiyeli, hücresel düzeyde etkiler ve oksidatif stres mekanizmaları hakkında hâlâ önemli bilgi boşlukları bulunmaktadır (Marcharla vd., 2024). İnsan kanında ve dokularında mikroplastik tespit edilmesi, gelecekte toksikokinetik çalışmaların daha da kritik hale geleceğini göstermektedir (Leslie vd., 2022). Bu nedenle sağlık risk değerlendirmeleri yalnızca mikroplastiklerin fiziksel varlığına değil, aynı zamanda birleşik kimyasal yüküne, taşıdığı patojenlere ve polimer tipine göre farklılaştırılmalıdır.

Ekosistem boyutunda ise mikroplastiklerin besin zincirindeki trofik transferi, popülasyon dinamiklerini ve habitat fonksiyonlarını gelecekte daha belirgin şekilde etkileyebilir. Özellikle zooplankton düzeyindeki baskılanmanın birincil üretim ve balık stokları üzerindeki uzun vadeli sonuçları henüz tam olarak belirlenmemiştir (Cole vd., 2013). Akdeniz gibi yarı kapalı denizlerde

mikroplastik yoğunluğunun artması, hem bölgesel ekosistem sürdürülebilirliği hem de ekonomik faaliyetler (balıkçılık, turizm) açısından yeni zorluklar ortaya koymaktadır (Çevik vd., 2021).

Mikroplastiklerin yönetimi konusunda gelecekte öne çıkacak temel unsurlar:

- Daha hassas ve standartlaştırılmış izleme yöntemlerinin geliştirilmesi,
- Atıksu arıtma sistemlerinde mikroplastik gideriminin iyileştirilmesi,
- Kaynağında azaltma stratejilerinin yaygınlaştırılması,
- Döngüsel ekonomi uygulamalarının zorunlu hale gelmesi,
- Uluslararası bağlayıcı düzenlemelerin artırılmasıdır.

Bu kapsamda, plastiklerin üretim-tüketim-atık yönetimi döngüsünün tüm aşamalarında politika bütünlüğünün sağlanması gerekmektedir (Mihai vd., 2022).

Sonuç olarak mikroplastik kirliliği, yalnızca çevresel bir sorun değil, aynı zamanda ekolojik, biyolojik ve toplumsal boyutları olan çok katmanlı bir sürdürülebilirlik krizi olarak değerlendirilmelidir. Mikroplastiklerin etkileri uzun vadeli olduğu için, bilimsel araştırmaların derinleşmesi, teknolojik çözümlerin geliştirilmesi ve uluslararası ölçekte politika iş birliğinin güçlendirilmesi gerekmektedir. Mikroplastiklerle mücadele, yalnızca çevre koruma yaklaşımından ibaret değildir; geleceğin ekosistem sağlığını, insan refahını ve küresel gıda güvenliğini doğrudan etkileyen bir zorunluluktur (Barboza vd., 2018).

10. Referanslar

1. Akarsu, C. (2025). Yüzey suları ve sedimentlerde mikropplastiklerin toksisite ve risk değerlendirmesi: Güncel yaklaşımlar ve sınırlamalar. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14(4), 1721-1731. doi:10.28948/ngumuh.165813
2. Andrady, A. L. (2011). Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 62(8), 1596-1605. doi:10.1016/j.marpolbul.2011.05.030
3. Anjum, F., Azam, A., Faseeh, H., Bano, R., Latif, M., & Fahid, A. U. M. (2023). Effects of microplastics on living organisms and their trophic transfer: An ecotoxicological review. *Futuristic Biotechnology*, 3(3). doi:10.54393/fbt.v3i03.77
4. Barboza, L. G. A., Vethaak, A. D., Lavorante, B. R. B. O., Lundebye, A.-K., & Guilhermino, L. (2018). Marine microplastic debris: An emerging issue for food security, food safety and human health. *Marine Pollution Bulletin*, 133, 336–348. doi:10.1016/j.marpolbul.2018.05.047
5. Botterell, Z. L. R., Ardren, J., Dove, E., McArthur, E., Addison, D. S., Adegbile, O. M., . . . Godley, B. J. (2025). A global assessment of microplastic abundance and characteristics on marine turtle nesting beaches. *Marine Pollution Bulletin*, 215, 117768. doi:10.1016/j.marpolbul.2025.117768
6. Chia, R. W., Lee, J.-Y., Kim, H., & Jang, J. (2021). Microplastic pollution in soil and groundwater: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 4211–4224. doi:10.1007/s10311-021-01297-6
7. Cole, M., Lindeque, P., Fileman, E., Halsband, C., Goodhead, R., Moger, J., & Galloway, T. S. (2013). Microplastic ingestion by zooplankton. *Environmental Science & Technology*, 47(12), 6646–6655. doi:10.1021/es400663f
8. Çevik, C., Kıdeyş, A. E., Tavşanoğlu, Ü. N., Kankılıç, G. B., & Gündoğdu, S. (2021). A review of plastic pollution in aquatic ecosystems of Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 1629–1649. doi:10.1007/s11356-021-17648-3
9. Dulta, K., Shankdhar, D., Bhardwaj, V., Bhardwaj, N., Peter, L., Aman, J., . . . Sharma, A. (2025). Microplastic: From marine pollution to the human food chain. *Food Bioscience*, 73, 107613. doi:10.1016/j.fbio.2025.107613
10. Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. doi:10.1126/sciadv.1700782
11. Gündoğdu, S., & Çevik, C. (2017). Micro- and mesoplastics in Northeast Levantine coast of Turkey: The preliminary results from surface samples.

- Marine Pollution Bulletin*, 118(1-2), 341-347.
doi:10.1016/j.marpolbul.2017.03.002
12. Ho, C. M., Feng, W., Li, X., Song, F., Yang, F., Liao, H., . . . Yu, X. (2025). Microplastic distribution and its implications for human health through marine environments. *Journal of Environmental Management*, 382, 125427. doi:10.1016/j.jenvman.2025.125427
 13. Horton, A. A., & Dixon, S. J. (2018). Microplastics: An introduction to environmental transport processes. *WIREs Water*, 5(2), e1268. doi:10.1002/wat2.1268
 14. Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., . . . Law, K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768-771. doi:10.1126/science.1260352
 15. Leslie, H. A., van Velzen, M. J. M., Brandsma, S. H., Vethaak, A. D., Garcia-Vallejo, J. J., & Lamoree, M. H. (2022). Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environment International*, 163, 107199. doi:10.1016/j.envint.2022.107199
 16. Marcharla, E., Vinayagam, S., Gnanasekaran, L., Soto-Moscoso, M., Chen, W.-H., Thanigaivel, S., & Ganesan, S. (2024). Microplastics in marine ecosystems: A comprehensive review of biological and ecological implications and its mitigation approach using nanotechnology for the sustainable environment. *Environmental Research*, 256, 119181. doi:10.1016/j.envres.2024.119181
 17. Mihai, F.-C., Gündoğdu, S., Markley, L. A., Olivelli, A., Khan, F. R., Gwinnett, C., . . . Molinos-Senante, M. (2022). Plastic pollution, waste management issues, and circular economy opportunities in rural communities. *Sustainability*, 14(1), 20. doi:10.3390/su14010020
 18. Özgüler, V., Gündoğdu, S., & Kıdeys, A. E. (2022). Riverine microplastic loading to Mersin Bay, Turkey on the North Eastern Mediterranean. *Marine Pollution Bulletin*, 174, 113264. doi:10.1016/j.marpolbul.2021.113264
 19. Queiroga, G., Vásquez-Ponce, F., Martins-Gonçalves, T., & Lincopan, N. (2025). Microplastics in marine pollution: Oceanic hitchhikers for the global dissemination of antimicrobial-resistant bacteria. *One Health*, 20, 101056. doi:10.1016/j.onehlt.2025.101056
 20. Rummel, C. D., Jahnke, A., Gorokhova, E., Kühnel, D., & Schmitt-Jansen, M. (2017). Impacts of biofilm formation on the fate and potential effects of microplastic in the aquatic environment. *Environmental Science & Technology Letters*, 4(7), 258–267. doi:10.1021/acs.estlett.7b00164
 21. Soysal, M. (2024). Mikroplastik tespitinde güncel stratejiler: Türkiye örneği. *Journal of Environmental and Natural Studies*, 6(2), 107-116. doi:10.53472/jenas.1439410

22. Stride, B., Abolfathi, S., Bending, G. D., & Pearson, J. (2024). Quantifying microplastic dispersion due to density effects. *Journal of Hazardous Materials*, 466, 133440. doi:10.1016/J.JHAZMAT.2024.133440
23. Suaria, G., Avio, C. G., Mineo, A., Lattin, G. L., Magaldi, M. G., Belmonte, G., . . . Aliani, S. (2016). The Mediterranean Plastic Soup: synthetic polymers in Mediterranean surface waters. *Scientific Reports*, 6, 37551. doi:10.1038/srep37551
24. Thanigaivel, S., Kamalesh, R., Ragini, Y. P., Saravanan, A., Vickram, A. S., Abirami, M., & Thiruvengadam, S. (2025). Microplastic pollution in marine environments: An in-depth analysis of advanced monitoring techniques, removal technologies, and future challenges. *Marine Environmental Research*, 205, 106993. doi:10.1016/j.marenvres.2025.106993
25. Wright, S. L., Thompson, R. C., & Galloway, T. S. (2013). The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review. *Environmental Pollution*, 178, 483–492. doi:10.1016/j.envpol.2013.02.031
26. Yu, X., Gutang, Q., Wang, Y., Wang, S., Li, Y., Li, Y., . . . Wang, X. (2024). Microplastic and associated emerging contaminants in marine fish from the South China Sea: Exposure and human risks. *Journal of Hazardous Materials*, 480, 136200. doi:10.1016/j.jhazmat.2024.136200
27. Zettler, E. R., Mincer, T. J., & Amaral-Zettler, L. A. (2013). Life in the “Plastisphere”: Microbial communities on plastic marine debris. *Environmental Science & Technology*, 47(13), 7137–7146. doi:10.1021/es401288x

BÖLÜM 30

Uçaklarda Elektrik Enerjisi Üretimi

Mehmet Dursun¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Havacılık ve Uzay bilimleri Fakültesi, Havacılık Elektrik Elektronik Bölümü, ORCID: 0000-0002-0558-6309

1. GİRİŞ

Bir uçağın tasarımı, uçağın görev profili, performans hedefleri, ekonomik parametreler ve yasal sınırlar dikkate alınarak yapılır. Örneğin uçak yolcu ya da yük taşıma amacıyla, savaş, keşif, gözetleme, eğitim, akrobasi, afet müdahale vb. görevleri icra etmek üzere tasarlanabilir. Bu görev türlerine göre uçağın menzil, hız, kalkış ve iniş mesafeleri vb. özellikleri belirlenir. Bu iş için ayrılan bütçe ve yasal sınırlar da dikkate alınarak tasarım ve üretim hedefine ulaşılmaya çalışılır. Tüm bu durumlar uçakların elektrik sistemlerinin kapasiteleri ve tasarımlarını önemli oranda etkiler.

Son yıllarda hava trafiğinde gözle görülür bir artış yaşanmaktadır. Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği'nin (IATA) Ekim 2025 tarihinde yayınlamış olduğu raporda küresel yolcu trafiğinin gelir yolcu kilometresi cinsinden ölçüldüğünde 2024 Ekim ayına oranla 2025 yılı Ekim ayında %6,6 lık bir artış olduğunu görülmektedir (IATA, 2025).

Airbus tarafından yayımlanan 2025–2044 Küresel Piyasa Öngörüsü, gelecek yirmi yıl içinde küresel ölçekte toplam 43.420 yeni yolcu ve kargo uçağına ihtiyaç duyulacağını tahmin edildiğini belirtmektedir. Bu durum hem yeni uçakların var olan filolara katılması hem de eski nesil verimlilikleri düşük uçakların yerlerine yenilerini koymak anlamına gelmektedir. (Airbus, 2025).

Raporlardan elde edilen sonuçlar uçakların gelecek yıllarda sayılarında artış öngörüsünü göstermektedir. Özellikle seyahat amaçlı uçuşlardaki yolcu konforunu artırmaya yönelik donanımların artması, gelişen teknolojilerin uçaklara yansımaları uçak içi enerji ihtiyaçlarını da artırmaktadır. Bu sebeple uçakta elektriğin nasıl temin edileceği, asıl ve yedek güç kaynaklarının belirlenmesi oldukça önemli bir konudur. Tüm bu kaynaklar, uçuşun öncesinde, uçuş esnasında ve yere indiğinde uçak için gerekli olan elektriği sağlar.

2. UÇAKLARDA ELEKTRİK ÜRETİM KAYNAKLARI

Uçaklarda kokpit ve uçuş sistemleri, aydınlatma ve güvenlik sistemleri, yolcu kabin sistemleri, uçak ve motor kontrol sistemleri çalışabilmeleri için doğrudan ya da batarya sistemleri üzerinden beslenmek üzere elektrik enerjisine ihtiyaç duyarlar.

Birinci Dünya Savaşı'ndan itibaren savaş uçaklarının ana motorlarının çalıştırılmaları, yer istasyonları ve diğer uçaklarla haberleşmelerinin sağlanması için elektrik enerjisine ihtiyaç duymuşlardır (Hockmeyer, 1946). İkinci Dünya Savaşı'na kadar geçen süre içerisinde uçaklar aydınlatma, ısıtma, sinyalizasyon gibi farklı ihtiyaçlarını karşılamak üzere daha fazla elektriğe ihtiyaç duymuşlardır. Kullanılan jeneratör güçleri yaklaşık dört kata yakın artış göstermiştir (Boice ve arkadaşları, 2009). Uçakların hız yeteneklerini artırmaya

başladığında uçak için rüzgâr ile elektrik üretme fikri yerini ana motordan alınan tahrik ile çalışan jeneratörlere bırakmıştır (Moir ve Seabridge, 2011).

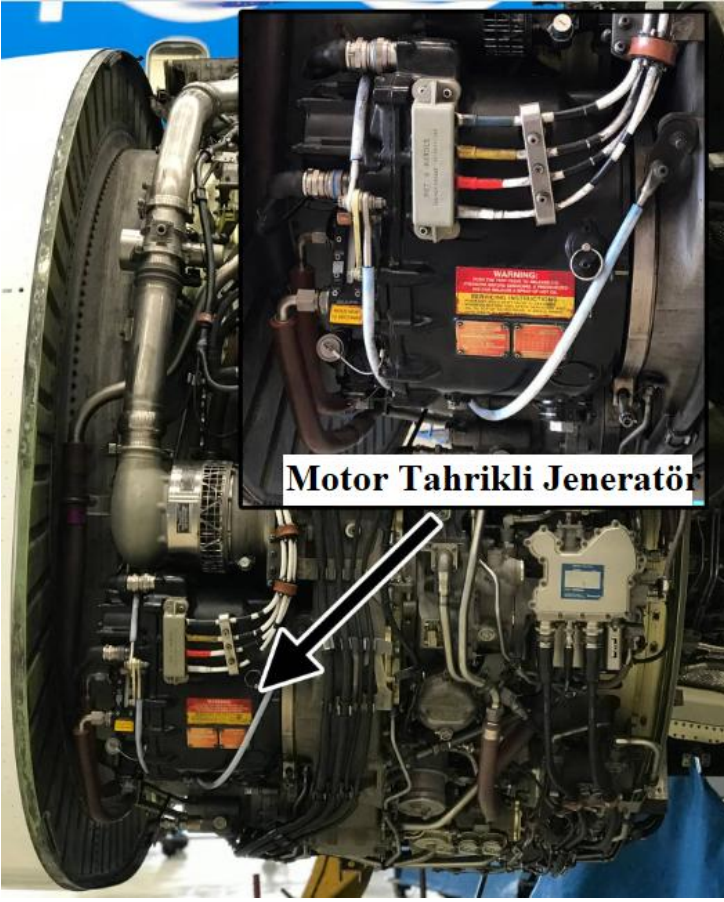
Uçaklarda voltaj seviyeleri ilk olarak 6Vdc, sonra 12Vdc, sonrasında 28Vdc ye dönüştürülmüş 1950’li yıllardan itibaren ise ilk olarak İngiliz V-Bombardıman uçaklarında 40KVA güce sahip 4 üniteli, üç fazlı, 400 Hz. frekansta ve 115/200 Vac gerilim seviyeli jeneratörler kullanılmıştır (Moir ve arkadaşları, 2013).

2.1. Motor Tahrikli Jeneratörler (MTJ)

Gücünü uçakların ana motorlarından alan bu sebeple motor tahrikli jeneratörler (MTJ) olarak bilinen jeneratörler uçaklarda elektrik enerjisi üreten birincil kaynaklardır. Temel prensip ana motorlardan alınan mekanik enerjinin elektrik enerjisine çevrilmesidir. Sistem uçağın tüm bölümlerine elektrik enerjisi tedarik eder.

Jeneratör sayısı uçakların ana motor sayılarına göre değişmekle birlikte, Boeing 777 gibi iki motorlu bir uçakta iki adet, Boeing 747-400 gibi dört motorlu uçaklarda ise dört adet motor tahrikli jeneratör bulunur. Örneğin Boeing 777’ birincil elektrik üretim sistemi 3 faz, 4 kablolu sabit 400 Hz. frekanslı, 115/200V AC olarak sağlanır. Burada belirtilen 4 kablodan üçü fazları kalan bir tanesi ise nötre aittir. Nötr uçak gövdesine irtibatlandırılır (Carl Tenning, 2015).

Şekil 1’ de MTJ’ye ait tahrik ünitesi görülmektedir. Yapı jeneratör ve motordan alınan tahrik gücünü uçağın ihtiyacı olan elektriksel özelliklere uygun olacak şekilde düzenleyen bir hız sürücüsünden oluşur. Uçağın ana motorları uçuş durumuna bağlı olarak gerekli seviyede bir itki üretmek üzere değişken devirlerde çalışır. Motordan aldığı tahrik ile enerji üreten jeneratör ise her zaman sabit bir gerilim ve frekansta elektrik üretmek zorundadır. Bu sebeple jeneratörün ihtiyacı olan sabit devir bu hız kontrol ünitesi tarafından sağlanır.



Şekil 1. Motor Tahrikli Jeneratör Sistemi (Flightradar, 2025)

2.2. Yardımcı Güç Ünitesi (YGÜ)

Yardımcı güç ünitesi (Yardımcı Güç Ünitesi, YGÜ), uçağın kuyruk bölümünde konumlandırılan ve yapısal olarak gaz türbini esaslı bir sistemdir. Ana motorlardan bağımsız olarak çalışan ve Şekil 2’ de görülen bu ünite; uçağın yer ve uçuş operasyonları sırasında ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisinin üretilmesi ile pnömatik ve hidrolik sistemler için gerekli güç ve basınçlı havanın sağlanmasından sorumludur.



Şekil 2. Yardımcı Güç Ünitesi (Boardinginfo, 2025)

Şekil 3’ de ise YGÜ’nin uçaktaki konumu gösterilmektedir. Bu konum uçağın üreticisi ve üretim amacına bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Fakat genel olarak resimde görüldüğü gibi uçakların kuyruk bölümü seçilir.



Şekil 3. Yardımcı Güç Ünitesi Konumu (Boardinginfo, 2025)

Bu tercih ünitenin çalışması esnasında ortaya çıkan atık gazların en verimli şekilde tahliyesi, ortaya çıkan gürültü, titreşim gibi istenmeyen etkilerin kabin ve kokpitte konforu azaltılmasının önüne geçilmesinin sağlanması amacıyla (Boardinginfo, 2025).

Uçaklar yerdeki operasyonlarda, park halinde ya da taksiye çıktıklarında bazı teknik kısıtlarla birlikte yer personelinin güvenliği ve uçağın yapısal olarak zarar görmemesi için tam güçte çalıştırılmazlar (Royce, 2015). Motordaki yanma

faaliyetinin devam ettiği fakat itkinin minimum seviyede tutulması gerektiği bu durumlarda uçağın ihtiyacı olan elektrik YGÜ tarafından sağlanır.

Uçaklar yerde bulundukları süre içerisinde de kabin içi aydınlatma, iklimlendirme ve basınçlandırma gibi sistemlerin aktif olarak çalışmasına ihtiyaç duyarlar. Bu sistemlerin yanı sıra kritik aviyonik sistemler de yerde çalışmaya hazır ya da çalışır durumda bulunurlar. YGÜ tüm bu sistemlerin elektrik ihtiyaçlarını karşılamak için vardır (Boardinginfo, 2025).

Uçuş sırasında oluşan bir motor arızası ya da ana motorlardan almış olduğu tahrik gücü ile elektrik üreten jeneratörlerin arızası durumlarında ise YGÜ devreye girer. Böylece uçak emniyetli bir şekilde inebilmek için gereken prosedürleri yerine getirebilecek enerji ihtiyacını karşılar (Moir ve arkadaşları, 2012).

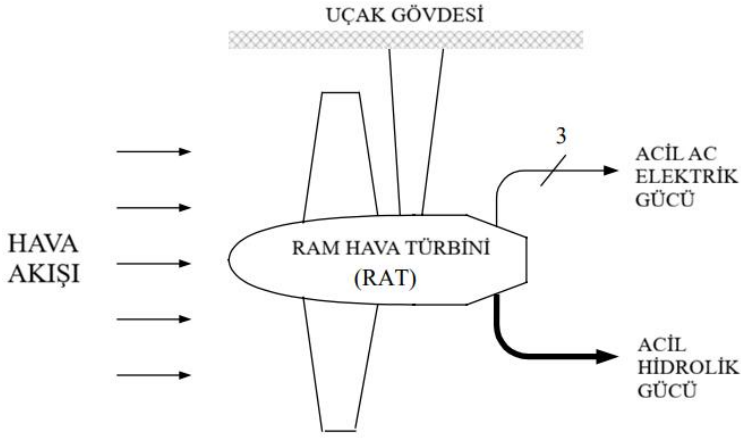
2.3. RAM Hava Türbini

RAM Hava Türbini ya da RAT olarak bilinen sistem, uçakta normal durumlarda elektrik üreten motor tahrikli jeneratörlerin tümünün ve YGÜ'nin çalışamaz durumunda kritik güç kaybı eşliğinin aşılması sebebi ile bazı uçaklarda otomatik olarak devreye giren bazı uçaklarda ise kokpitten manuel olarak devreye alınan bir yedek güç üreticidir. Amaç uçağın tamamen enerjisiz kalmasına engel olmaktır. Böylece uçuş kontrol bilgisayarı gibi kritik sistemlerin çalışması sürdürülerek pilotların uçağı güvenli şekilde indirebilmeleri sağlanır. Bu sebeple RAT hayati bir güvenlik bileşenidir. RAT Şekil 4. de görüldüğü gibi uçağın alt kısmında bulunur.



Şekil 4. RAM Hava Türbini (Pilotpulse, 2025)

Kritik güç kaybı seviyesi aşıldığında, RAT otomatik olarak ya da pilot tarafından aktive edilir, gövde altında bulunan kapak açılarak RAT çalışmaya hazır hale gelir.



Şekil 5. RAM Hava Türbini (11)

Standart uçaklarda RAT pervane çapı 80 cm civarında iken Airbus A380’lerde 1,62m değere sahiptir. Bu bir ticari uçaktaki en büyük RAT pervane çapıdır (Pilotpulse,2025; Coles ve arkadaşları, 2002).

Hava akımından almış olduğu enerji ile dönen pervane türbini döndürerek acil durum jeneratörünü veya acil durum hidrolik pompasını ihtiyaç halinde ise her ikisini birlikte çalıştırır. Böylece uçağa acil durum enerjisi sağlanmış olur. RAT gücü uçaktan uçağa farklılık göstermekle birlikte 5-15kVA aralığındadır (Moir ve arkadaşları, 2012).

2.4. Bataryalar

Bataryalar doğrudan elektrik üreten bir kaynak olmamakla birlikte uçak elektrik enerji kaynaklarını kritik bir güvenlik bileşeni olarak tamamlarlar. Uçakta daha önce saymış olduğumuz ana enerji üretim kaynakları tarafından şarj edilerek elektrik enerjisinin kimyasal formda depo edilmelerini sağlarlar.

Bataryalar sistem başlatma, acil durum ve enerji dengeleme gibi görevleri yerine getirmek amacıyla ihtiyaç halinde doğrudan devreye girerek herhangi bir kesinti olmadan güvenli uçuşu sağlarlar.

Uçaklarda kullanılan bataryalar;

- Kurşun-Asit bataryalar,
- Nikel-Kadmiyum Bataryalar
- Lityum-İyon Bataryalar

olarak tasarlanırlar (Tariq ve arkadaşları, 2017). Birbirlerine göre avantaj ve dezavantajlara sahiptirler. Uçağın büyük, orta yada küçük ölçekte olması, sivil ya da askeri havacılıkta kullanılma durumu, yük ya da yolcu taşıma amaçları gibi parametreler sebebiyle uçaktan uçağa kullanım farklılıkları göstermektedirler. Örneğin küçük ölçekli uçaklarda kurşun asit bataryalar tercih edilirken modern uçaklarda lityum-iyon bataryalar daha yoğun olarak tercih edilmektedir. Temel özellikler bakımından bir tercihte bulunacak isek bataryanın;

- Kapasitesi, çalışma gerilim seviyesi
- Sağlayabileceği maksimum deşarj akımı
- Güvenli çalışma sıcaklık değerleri
- Şarj-deşarj çevrim sayısı
- Yükte gerilim kararlılığı ve dinamik iç direnci

çok önemli değerlendirme kriterleridir (Tariq ve arkadaşları, 2017).

3. SONUÇ

Bu bölümde, havacılık platformlarının elektrik enerjisi temini ve kesintisiz hizmet sürekliliği bağlamında kritik bir rol oynayan elektrik üretim ve depolama kaynakları kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Hava trafiğindeki artış, yolcu konforunu artıran sistemlerin çeşitlenmesi ve aviyonik teknolojilerindeki gelişmeler, uçakların elektriksel güç talebini geçmişe kıyasla önemli ölçüde artırmıştır. Bu gelişme, birincil ve yedek güç kaynaklarının tasarım ve entegrasyonunun uçak emniyeti ile operasyonel süreklilik açısından vazgeçilmez bir gereklilik olduğunu ortaya koymaktadır.

Ana motorlara mekanik olarak bağlı bulunan motor tahrikli jeneratörler uçağın birincil elektrik enerjisi kaynağını oluşturmaktadır. Tüm sistemlerde, uçuş koşullarından bağımsız olarak sabit gerilim ve frekans değerlerinin sağlanması, hız kontrol üniteleri aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Yardımcı güç ünitelerinin ise özellikle yer operasyonları ile acil durum senaryolarında platformun elektrik, pinomatik ve hidrolik ihtiyaçlarını karşılayarak sistem bütünlüğü ve sürekliliğini sağlamada önemli katkıları vardır. Bunun yanı sıra, tüm birincil güç kaynaklarının arızalandığı nadir ancak kritik durumlarda, RAM hava türbini devreye girerek sadece hayati sistemlere enerji sağlaması, bu bileşenin uçuş emniyeti açısından zorunlu bir yedek güç unsuru olduğunu teyit etmektedir.

Batarya sistemleri, doğrudan enerji üretimi gerçekleştirmemekle birlikte, ani yük taleplerinin karşılanması, sistem başlatma prosedürleri ve acil durum enerji desteği gibi işlevleri yerine getirerek uçak elektrik mimarisinin tamamlayıcı ve stratejik bir bileşeni olarak önem kazanmaktadır. Kullanılacak batarya teknolojisinin seçiminde, kapasite, şarj-deşarj çevrim ömrü, termal kararlılık ve yük altındaki gerilim performansı gibi parametreler dikkate alınmalıdır. Özellikle

modern havacılık platformlarında lityum-iyon bataryaların yaygınlaşması, sundukları yüksek enerji yoğunluğu ve ağırlık optimizasyonu avantajları ile açıklanabilir.

Sonuç olarak, uçak elektrik sistemlerinin tasarımı, görev profili, emniyet gereksinimleri, enerji verimliliği ve yedeklilik prensipleri göz önünde bulundurularak bütüncül bir yaklaşımla ele alınmalıdır. İlerleyen dönemde, artan oranda elektrikli alt sistem barındıran ve “Daha Elektrikli Uçak” konseptine doğru evrilen platformlarda, mevcut güç kaynaklarının kapasite, güvenilirlik ve sistem entegrasyon düzeylerinin daha da belirleyici olacağı öngörülmektedir.

KAYNAK

- IATA, Air Passenger Market Analysis, October 2025, <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/air-passenger-market-analysis-october-2025/>
- Airbus, 2025, https://www.airbus.com/en/products-services/commercial-aircraft/global-market-forecast?utm_source=chatgpt.com
- Hockmeyer, I. O. (1946). The generation and regulation of electric power in aircraft: a survey of design features of generators and their control. *Journal of the Institution of Electrical Engineers-Part II: Power Engineering*, 93(31), 2-14.
- Boice, WK ve Levoy, LG (2009). Büyük Uçaklar İçin Elektrik Sistemlerinin Seçiminde Temel Hususlar. *Amerikan Elektrik Mühendisleri Enstitüsü İşlemleri*, 63 (6), 279-287.
- I. Moir and A. Seabridge, "Electrical systems," in *Aircraft Systems: Mechanical, Electrical, and Avionics Subsystems Integration*, vol. 52. New York, NY, USA : Wiley, 2011, pp. 181–237.
- I. Moir, A. Seabridge, and M. Jukes, "Electrical systems," in *Civil Avionics Systems*, 2nd ed. New York, NY, USA : Wiley, 2013, pp. 235–290.
- Carl Tenning, https://www.angelfire.com/ct3/cttenning/electrical_essay/777elecpr/777_design.html, Retrieved 10 August 2015.
- Flightradar, 2025 <https://www.flightradar24.com/blog/aviation-explainer-series/aircraft-electrics>
- Boardinginfo, 2025 <https://boardinginfo.com/ucaklardaki-yardimci-guc-unitesi-apu-nedir/>
- Rolls Royce, P. (2015). *The jet engine*. John Wiley & Sons.
- Moir, I., Seabridge, A., Belobaba, P., & Cooper, J. (2012). *Design and development of aircraft systems*. John Wiley & Sons.
- Pilotpulse, 2025 <https://pilotpulse360.com/understanding-the-a320-rat-ram-air-turbine-deployment/>
- Koerner M., Recent developments in aircraft emergency power. In *Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit, 2000.(IECEC) 35th Intersociety 2000* (Vol. 1, pp. 12-19). IEEE.
- Coles JR, Holme M, Doyle JP, inventors; Lucas Industries Limited, assignee. Electrical generator an aero-engine including such a generator, and an aircraft including such a generator. United States patent US 6,467,725. 2002 Oct 22.
- Tariq, M., Maswood, A. I., Gajanayake, C. J., & Gupta, A. K. (2017). Aircraft batteries: current trend towards more electric aircraft. *IET Electrical Systems in Transportation*, 7(2), 93-103.

BÖLÜM 31

Temassız Kırmataş Agregaların Şekilsel Özelliklerinin Görüntü İşleme Yöntemiyle Elde Edilmesi

İbrahim Yiğit¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0001-5485-9222

Giriş

Agregalar, beton, asfalt kaplama ve dolgu olmak üzere, pek çok altyapı ve üstyapı malzemesinin hacimce en büyük bileşenidir. Danelerin boyut dağılımı, mineralojik bileşimi ve dayanımlarının yanı sıra şekilsel özellikleri de malzemenin mühendislik performansını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle agrega şeklinin güvenilir, tekrarlanabilir ve mümkün olduğunca nesnel biçimde tanımlanması, tasarımının vazgeçilmez bileşenlerinden biri haline gelmiştir. Geleneksel yaklaşımlar, agrega şeklinin elde edilmesinde genellikle kumpas ile yapılan basit ölçümlere, yuvarlaklık şablonlarına veya yassılık–uzunluk oranı gibi tekil göstergelere dayanmaktadır. Bu yöntemler pratik olmakla birlikte, operatöre bağlı yorum farklılıkları, sınırlı örneklem büyüklüğü ve yüzey pürüzlülüğü gibi daha karmaşık morfolojik özellikleri temsil edememeleri nedeniyle yetersiz kalmaktadır. Görüntü işleme ve sayısal görüntü analizindeki gelişmeler, agregaların şekil, açısallık ve yüzey dokusunun iki ya da üç boyutlu görüntüler üzerinden nicel olarak tanımlanmasına imkân tanımış; böylece hem literatürde hem de uygulamada önemli bir paradigma değişimi ortaya çıkmıştır. Bu kitap bölümünde, iki farklı taş ocağından alınan kırmataş numuneleri üzerinde görüntü işleme yöntemiyle yuvarlaklık ve küresellik gibi parametrelerin hesaplandığı bir çalışma ayrıntılı biçimde sunulurken, literatürdeki yöntemlerle karşılaştırmalı bir tartışma yapılmaktadır.

Agrega şekil özellikleri ve parametreleri

Agrega morfolojisi genel olarak boyut (size), şekil (shape), açısallık (angularity) ve yüzey dokusu (surface texture) bileşenleriyle tanımlanır. Boyut, danenin karakteristik uzunluklarıyla; şekil, bu uzunlukların birbirine oranları ve danenin küresel geometriye benzerliğiyle; açısallık, köşe ve kenarların keskinliğiyle; yüzey dokusu ise mikro ölçekte pürüzlülük ve pürüzsüzlükle ilişkilidir. Wadell yaklaşımına göre yuvarlaklık (roundness), danenin köşe yarıçaplarının, aynı alanlı bir dairenin yarıçapına oranlanmasıyla tanımlanırken, küresellik danelerin üç boyutlu boyut oranlarını dikkate alır (Wadell 1932, 1933). Pratikte çoğu zaman iki boyutlu izdüşüm üzerinden yuvarlaklık ve dairesellik (circularity) parametrelerinin kullanıldığı görülmektedir.

İki boyutlu görüntü analizine dayalı çalışmaların önemli bir kısmında, danenin izdüşüm alanı ve çevresi kullanılarak dairesellik ve yuvarlaklık indeksleri hesaplanmaktadır (Janoo, 1998; He vd., 2016). Dairesellik çoğunlukla, aynı alanlı dairenin çevresi ile gerçek danenin çevresi arasındaki ilişkiye dayanan boyutsuz bir parametre olarak tanımlanır. Yuvarlaklık ise danenin en uzun ve en kısa boyutlarının oranı veya köşe yarıçaplarının istatistiksel özellikleri ile ilişkilendirilebilmektedir. Bunlara ek olarak, Form2D gibi bileşik indeksler; izdüşüm alanı, çevre ve ana boyutlar gibi birden fazla geometrik büyüklüğü aynı anda dikkate alarak daha kararlı bir şekil tanımı sunmayı hedeflemektedir (Al-Rousan vd., 2007).

Dane şeklinin sayısal görüntü işleme yöntemiyle belirlenmesi

Görüntü işleme tabanlı agrega şekil analizi yaklaşımı, temel olarak üç ana aşamadan oluşur: (i) görüntülerin uygun koşullarda elde edilmesi, (ii) görüntülerin işlenerek danelerin arka plandan ayrılması ve (iii) danelere ait geometrik parametrelerin otomatik olarak hesaplanması. İlk aşamada, sabit bir kamera–numune mesafesi, homojen ve gölgesiz aydınlatma, yüksek kontrastlı bir arka plan ve uygun çözünürlükte görüntü alma esastır. İkinci aşamada gri seviye dönüşümü, eşikleme (thresholding), filtreleme ve kenar belirleme gibi işlemlerle her bir dane net biçimde segment edilir. Son aşamada ise daneye ait alan, çevre, ana eksen uzunlukları, momentler ve biçim fonksiyonları kullanılarak çeşitli morfolojik indeksler türetilir (Chandan vd., 2004).

Görüntü işleme alanında morfolojik algoritmaların kullanımı da agrega yapısının değerlendirilmesinde önemli bir yer tutmaktadır. İskeletleştirme (skeletonization), açma–kapama (opening–closing) ve bölge büyütme gibi morfolojik işlemler, hem dane sınırlarının daha doğru belirlenmesine hem de kaplama kesitlerindeki boşluk yapısı ve agrega iskeletinin analizi gibi daha karmaşık problemlerin çözülmesine olanak tanımaktadır.

Kırmataş agregaların şekil analizi: malzeme ve yöntem

Bu bölümde, iki farklı taş ocağından temin edilen kırmataş agregalar üzerinde gerçekleştirilen ve kırmataş agregaların şekilsel özelliklerinin görüntü işleme yöntemi ile elde edilmesini amaçlayan çalışma özetlenmektedir (Yiğit ve Kurt, 2019). Çalışmada özellikle yuvarlaklık ve küresellik gibi şekilsel parametrelerin, geliştirilen görüntü işleme prosedürü ile nasıl hesaplandığı ve farklı ocaklardan gelen agregalar için elde edilen sonuçların nasıl karşılaştırıldığı açıklanmaktadır.

Çalışmada kullanılan malzeme, karayolu kaplamalarında yaygın olarak kullanılan iki ayrı kırmataş ocağından alınan agrega numunelerinden oluşmaktadır. Her bir ocak için standart elek analizi sonucunda belirlenen bir veya birden fazla tane boyu fraksiyonu seçilmiş, her fraksiyon için istatistiksel olarak anlamlı sayıda dane deney kapsamına alınmıştır. Numuneler, dane yüzeyinde toz ve ince malzemenin görüntü kalitesini olumsuz etkilememesi için yıkanarak kurutulmuş, daha sonra görüntüleme aşamasına hazırlanmıştır. Görüntüleme sistemi, sabit odaklı bir dijital kamera, homojen aydınlatma sağlayan bir ışık düzeni ve koyu renkli bir arka plan düzeneğinden oluşmaktadır. Kamera ile numune düzlemi arasındaki mesafe sabitlenmiş, her bir görüntüde yalnızca tek katman halinde serilen danelerin yer almasına dikkat edilmiştir. Bu sayede hem ölçekte tutarlılık sağlanmış hem de danelerin birbirini örtmesi engellenmiştir (Şekil 1).

Kırmataş agregaların şekil analizi: malzeme ve yöntem

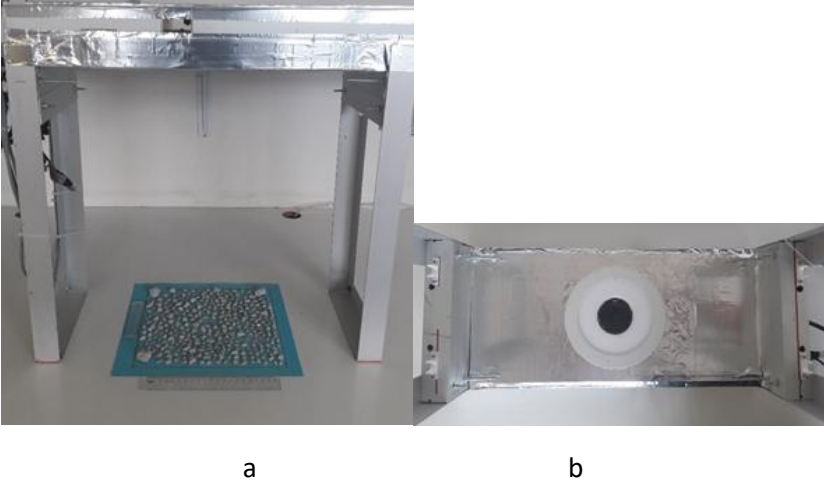
Bu bölümde, iki farklı taş ocağından temin edilen kırmataş agregalar üzerinde gerçekleştirilen ve kırmataş agregaların şekilsel özelliklerinin görüntü işleme

yöntemi ile elde edilmesini amaçlayan çalışma özetlenmektedir (Yiğit ve Kurt, 2019). Çalışmada özellikle yuvarlaklık ve küresellik gibi şekilsel parametrelerin, geliştirilen görüntü işleme prosedürü ile nasıl hesaplandığı ve farklı ocaklardan gelen agregalar için elde edilen sonuçların nasıl karşılaştırıldığı açıklanmaktadır.

Çalışmada kullanılan malzeme, karayolu kaplamalarında yaygın olarak kullanılan iki ayrı kırmataş ocağından alınan agrega numunelerinden oluşmaktadır. Her bir ocak için standart elek analizi sonucunda belirlenen bir veya birden fazla tane boyu fraksiyonu seçilmiş, her fraksiyon için istatistiksel olarak anlamlı sayıda dane deney kapsamına alınmıştır. Numuneler, dane yüzeyinde toz ve ince malzemenin görüntü kalitesini olumsuz etkilememesi için yıkanarak kurutulmuş, daha sonra görüntüleme aşamasına hazırlanmıştır. Görüntüleme sistemi, sabit odaklı bir dijital kamera, homojen aydınlatma sağlayan bir ışık düzeni ve koyu renkli bir arka plan düzeneğinden oluşmaktadır. Kamera ile numune düzlemi arasındaki mesafe sabitlenmiş, her bir görüntüde yalnızca tek katman halinde serilen danelerin yer almasına dikkat edilmiştir. Bu sayede hem ölçekte tutarlılık sağlanmış hem de danelerin birbirini örtmesi engellenmiştir (Şekil 1).

Görüntü alma düzeneği

Görüntüleme süreçlerinde, analiz edilecek nesnenin doğru biçimde aydınlatılması büyük önem taşır. Uygun olmayan ışık koşulları gölgelenmelere neden olarak görüntü işleme sırasında hatalara yol açabilir. Literatürde yaygın olarak kullanılan aydınlatma prensipleri Erhardt (2000) ve Dipova (2018) tarafından ayrıntılı biçimde açıklanmıştır. Bu çalışmada kullanılan görüntü alma sistemi Şekil 1’de gösterilmiştir. Düzenekte objektif etrafına yerleştirilmiş halkasal LED aydınlatma yapısı kullanılmıştır (Yiğit ve Kurt 2019). Bu sistem, ışığın nesneye kamera ile aynı doğrultudan uygulanmasını sağlayarak gölge etkisini en aza indirir ve yansıyan ışığın verimli biçimde toplanmasına imkân tanır. Görüntüler, 14 MP çözünürlüklü Nikon L310 kamera ile elde edilmiştir. Kumara ve ark. (2012)’de de olduğu gibi, danelerin arka plandan kolayca ayrılabilmesi için mavi renkli bir fon tercih edilmiştir.



Şekil 1 Görüntü alma düzeneği a) Önden görünümü ve koyu arka fon üzerindeki kırmataş agrega numunelerinin yerleşimi, b) Alttan görünümü, siyah renkli merkezdeki objektif ve objektifi saran beyaz renkli led aydınlatmanın yerleşimi

Görüntülerin İşlenmesi

Görüntü alma düzeneğinden alınan renkli görüntüler Şekil 3.a'daki gibidir. Bu görüntünün sağ-alt köşesinin detayı Şekil 3.b'de verilmiştir. Bu renkli görüntüler öncelikle gri tonlu formata dönüştürülmüş, ardından da ikili (binary) görüntüye dönüştürülmüştür (Şekil 3.c). Yine bu görüntünün sağ-alt köşesinin detayı Şekil 3.d'de verilmiştir. Görüntülerdeki gürültülü küçük bölgeler ve gölgeler, morfolojik filtreler yardımıyla temizlenmiş; böylece her bir dane, arka plandan net biçimde ayrıştırılmıştır. Daha sonra her bir daneye ait izdüşüm alanı, çevre uzunluğu ve ana eksen boyutları hesaplanmıştır.

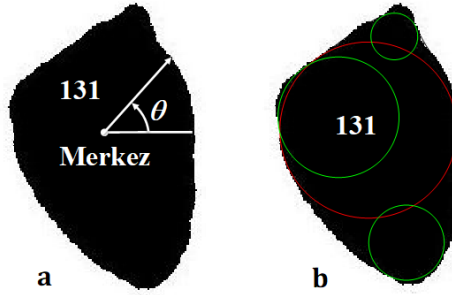
Yuvarlaklık, danenin en kısa ve en uzun boyutları arasındaki oran ve/veya çevre–alan ilişkisine bağlı olarak tanımlanmış, küresellik ise danenin küresel bir geometriye ne ölçüde yaklaştığını gösteren bileşik bir indeks olarak hesaplanmıştır. Bu noktada literatürde önerilen Form2D gibi indekslerden esinlenilmiş; ancak önerilen yöntemde hesaplamaların tamamen iki boyutlu izdüşüm üzerinden, otomatik bir görüntü işleme betiğiyle yapılması hedeflenmiştir. Bulunan tüm parametreler, her taş ocağı ve tane boyu fraksiyonu için istatistiksel olarak özetlenmiş; ortalama, standart sapma ve dağılım aralıkları belirlenmiştir.

Agrega tanelerinin şekil özellikleri, iki boyutlu görüntüler üzerinden elde edilen izdüşüm alanı ve çevre bilgisi kullanılarak tanımlanabilir. Bu amaçla önce tanenin dış sınırı belirlenir, sınır noktaları bir araya getirilerek kapalı bir poligon oluşturulur ve bu poligonun geometrisi analiz edilir. Minimum çevrel çemberin belirlenmesi, tanenin dış sınırını oluşturan noktalar arasındaki en uzak konumların bulunması ve bu noktalara dayalı bir çemberin oluşturulmasıyla

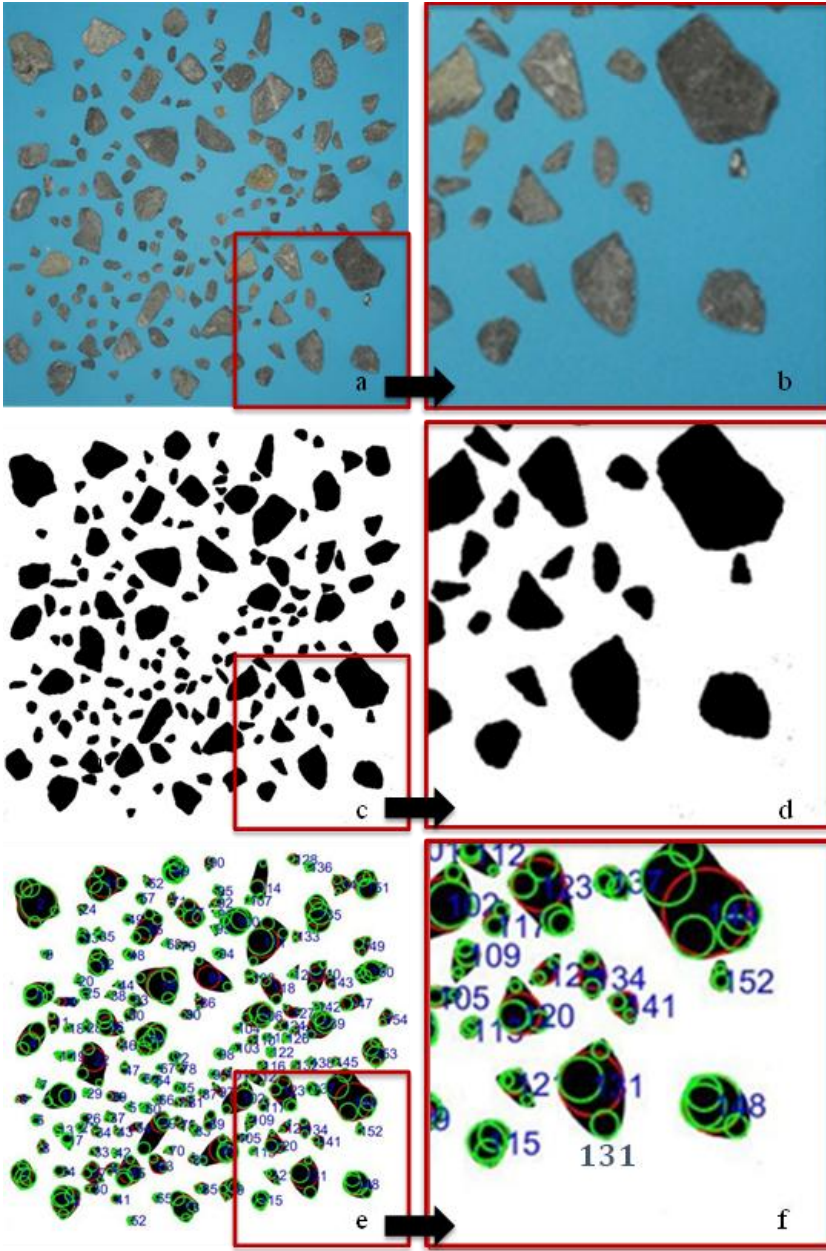
yapılır. Oluşturulan çember tüm noktaları kapsıyorsa minimum çember olarak kabul edilir; kapsamadığı durumlarda çember dışındaki noktalar hesaplama dâhil edilerek işlem tekrarlanır.

Zheng ve Hryciw (2015), dane uzunluğu ve genişliğini belirlemek için ASTM D4791 ve ASTM D3398 standartlarına benzer bir prosedür izlemiştir. Bu yaklaşımda agreganın görüntüsü, farklı açılarda denenmiş dikdörtgen sınırlama kutuları içinde değerlendirilir ve boyutları en büyük olan kutu, danenin uzunluk ve genişlik ölçülerini temsil eder. En büyük iç teğet çember, Öklid mesafe haritası kullanılarak tespit edilir; Şekil 2.a'da her pikselin en yakın sınır pikseline olan uzaklığı hesaplanarak bir mesafe dağılımı oluşturulur. En yüksek mesafe değeri, iç teğet çemberin yarıçapını ve merkezini tanımlar (Zheng ve Hryciw, 2015). Şekil 2.b'deki kırmızı çember buna örnek olarak verilmiştir.

Zheng ve Hryciw (2015), yuvarlaklık değerlendirmesinde Lokal Regresyon (LOESS) ve K-katlamalı çapraz doğrulama yöntemlerini kullanarak pürüzlü dış sınırı sadeleştirmiştir. Wadell'in yuvarlaklık tanımında, tanedeki köşe bölgelerinin yarıçap ortalaması ile taneyi çevreleyen hayali çemberin yarıçapı karşılaştırılır. Bu yaklaşımda köşelerin belirlenmesi ve bu noktalara en uygun çemberin yerleştirilmesi gerekir. Fourier analizi, köşelilik indeksi ve fraktal tabanlı yöntemler yalnızca belirli köşe noktalarını değil, tanenin tüm dış sınırındaki eğrilik değişimini değerlendirir. Şekil 2.b, 3.a'da Gander vd. (1994) tarafından önerilen daire uydurma yöntemi uygulanmıştır.



Şekil 2 a) Dane merkezinden radyal mesafelerin piksel biriminde ölçülmesi, b) Dane köşelerine uygun çemberlerin yerleştirilmesi



Şekil 3 Dane yuvarlaklığının elde edilmesi için kırmataş agreganın görüntü işleme süreci, a) RGB görüntü, b) RGB görüntü detayı c) Binary görüntü, d) Binary görüntü detayı, e) Dane yuvarlaklığı için çizilen çemberler, f) Dane yuvarlaklığı için çizilen çemberler detay görüntüsü

Sonuçlar ve tartışma

İki farklı kırmataş ocağından alınan ve her bir ocak için üçer numune üzerinde gerçekleştirilen morfolojik analizler kapsamında, yuvarlaklık ve beş farklı küresellik tanımı kullanılarak toplam altı parametre değerlendirilmiştir. Aynı kaynağa ait numunelerin morfolojik parametreleri arasındaki farkların düşük olduğu, dolayısıyla her bir numunenin ilgili ocağı temsil edebilir nitelikte olduğu görülmüştür. Kaynaklar arası karşılaştırmada ise ikinci kırmataş ocağına ait numunelerin tüm parametrelerde birinci ocağa kıyasla sınırlı ölçüde daha yüksek ortalama değerlere sahip olduğu belirlenmiştir. Ancak gözlenen farkların mutlak değerleri oldukça düşük olup, doğal agrega varyasyonu sınırları içerisinde kalmaktadır. Bu nedenle, iki farklı kaynaktan elde edilen kırmataş numunelerinin yuvarlaklık ve küresellik temelli morfolojik özellikleri arasında istatistiksel ve mühendislik açısından anlamlı bir farklılık bulunmadığı, numunelerin benzer morfolojik karaktere sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Kaynaklar

- Al-Rousan, T., Masad, E., Tutumluer, E., & Pan, T. (2007). Evaluation of image analysis techniques for quantifying aggregate shape characteristics. *Construction and Building Materials*, 21(5), 978-990.
- ASTM D 3398-00 (2000) Standard Test Method for Index of Aggregate Particle Shape and Texture, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 4791-99 (1999) Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.03, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.
- Chandan, C., Sivakumar, K., Masad, E., & Fletcher, T. (2004). Application of imaging techniques to geometry analysis of aggregate particles. *Journal of Computing in Civil Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(2004\)18:1\(75\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2004)18:1(75))
- Dipova N (2018) Görüntü Analizi Yöntemlerinin Geoteknik Mühendisliğinde Kullanımı. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 9(1): 33-44
- Erhardt A (2000). *Theory and Applications of Digital Image Processing*, University of Applied Sciences, 54p.
- Gander, W., Golub G H and Strebel R (1994) Least-squares fitting of circles and ellipses. *BIT Numer. Math.*, 34(4): 558–578.
- He, H., Courard, L., Pirard, E., & Michel, F. (2016). Shape analysis of fine aggregates used for concrete. *Image Analysis & Stereology*. <https://doi.org/10.5566/IAS.1400>
- Janoo, V. C. (1998). *Quantification of Shape, Angularity, and Surface Texture of Base Course Materials*.
- Kumara G H A J J, Hayano K and Ogiwara K (2012) Image Analysis Techniques on Evaluation of Particle Size Distribution of Gravel. *Int. J. Geomate*, 3(1): 290–297.
- Masad, E. (2001). Review of imaging techniques for characterizing the shape of aggregates used in asphalt mixes.
- Wadell H (1932) Volume, shape and roundness of rock particles. *J. Geol.* 40(5): 443–451.
- Wadell H (1933) Sphericity and roundness of rock particles. *J. Geol.* 41(3): 310–331.
- Yiğit, İ., ve Kurt, T., (2019). Kırmataş Agregaların Şekilsel Özelliklerinin Görüntü İşleme Yöntemi ile Elde Edilmesi. *International Conference on Artificial*

Intelligence and Applied Mathematics in Engineering (pp.170-179). Antalya, Turkey

Zheng J and Hryciw R D (2015) Traditional soil particle sphericity, roundness and surface roughness by computational geometry. *Géotechnique*, 65(6): 494–506

BÖLÜM 32

Atık Polietilen Tereftalat (PET) Malzemenin Yapı Malzemesi Olarak Kullanım Alanları

Altan Yılmaz¹ & Esra Osmanbeyoğlu²

¹ Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ORCID No: 0000-0001-9925-6812

² Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Giriş

Endüstriyel olarak gelişmiş ülkelerde başta gelen çevresel, ekonomik ve sosyal sorunlardan biri katı atıkların yönetimi ve yok edilmesidir. Artan atık problemlerini kontrol edebilmek için; kaynak azaltılması, yeniden kullanım, geri dönüşüm ve çöp alanlarında toplama ve çöp fırınında yakma işlemlerinin tamamını içeren bir atık yönetim sistemi uygulanmalıdır. Bu yöntemlerden birisi olan geri dönüşüm işlemi, son yıllarda çoğu araştırmacının üzerinde durduğu konulardan birisidir. Son yıllarda yapılan araştırmalarda, plastik atıkların beton üretiminde geri dönüşümü konusuna sıklıkla rastlanmaktadır. Genellikle kullanılan plastik atıklar, Polipropilen (PP), Polietilen (PE), Polietilen tereftalat (PET) ve Polistren (PS)'dir. Bu plastik atıklar içinde tüketim artış hızı en yüksek olanı PET'dir. 1980'li yılların başında ülkemizde ilk kez Polietilen tereftalat (PET) şişeler üretilmeye başlanmıştır. Su ambalajlarında kullanılmaya başlanan PET şişeler çok kısa süre içinde sıvı gıda maddelerinin ambalajlanmasında yaygın olarak kullanılır hale gelmiştir. Plastik atıklar her türlü doğa şartı altında uzun süre çözünmediği için çevre kirliliği problemlerinin artmasına zemin hazırlamaktadır. Dolayısıyla, doğal kaynakları korumak ve çevre kirliliğini önlemek amacıyla çalışmalar yapılmakta ve projeler geliştirilmektedir. Günümüzde bu kirliliği azaltabilmek için uygulanabilecek akılcı yöntemlerden biri, bu malzemeleri diğer endüstrilerde kullanmaktır. Genel olarak atık malzemelerin yeniden kullanımındaki en önemli alan, malzemelerin büyük çoğunluğunun geri dönüşümde değerlendirilebildiği inşaat uygulamalarıdır. Atık PET'lerin eritilip tekrar işlenerek, yeniden kullanımının maliyeti oldukça yüksektir. Ancak, atık PET şişelerin parçalanıp hafif agrega olarak kullanılması; diğer geri dönüşüm yöntemlerinde kullanılan temizleme ve renk içeriğinin değiştirilmesi gibi uygulamalara gerek olmadığında, yeniden işleme maliyetini düşürmesi açısından oldukça avantajlıdır. Beton üretimi için çok miktarda doğal agregaya ihtiyaç vardır. Bu yüzden, PET atıkların beton üretiminde agrega olarak kullanılması, atıkların güvenli bir şekilde yok edilmesinin yanında doğal agrega elde etmek için çevreye verilen zararların azaltılmasını da sağlayacaktır (Akçaözoğlu, 2008). Bu çalışmada atık PET'lerin inşaat sektöründe kullanımı (geri dönüşüm uygulamaları) incelenmiştir. Çalışma, ilgili kaynakların taranması yöntemine dayanmaktadır.

Atık Plastikler

Plastik, petrokimya sanayinde petrol esaslı ürün veya ürünler ile doğalgazı hammadde olarak kullanıp, bunların kimyasal dönüşümleri ile elde edilen önemli madde gruplarından birisidir. Hafif olmaları, paslanmaz ve korozyona uğramaz olmaları, yüksek ısı ve elektrik izolasyonu sağlamaları, kolay hasara uğramamaları, esnek ve yumuşak olmaları ve kolay şekil verilebilme gibi özellikler, plastikleri vazgeçilmez paketleme malzemesi yapmıştır. Dünyada üretilen petrolün %4'ü plastik üretiminde kullanılmaktadır.

Ülkemizde, 1991 yılında yürürlüğe giren Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği (KAKY)’nin 18. Maddesine göre, yönetmeliğin yürürlüğe girdiği tarihten itibaren 10 yıl içinde, sorumlu ekonomik işletmeler ambalaj atıklarının ağırlık itibari ile en az %60’ını geri kazanmakla yükümlüdürler. Bu sayede her yıl 10 bin ton atık PET şişe geri kazanılmaktadır (Pehlivan ve ark., 2004).

Polietilen Tereftalat (PET) Malzeme

PET, termoplastik polyester reçinesi özelliğinde bir ambalaj malzemesidir. Polyester kelimesi Yunanca pek çok anlamına gelen “Poly” ve asitlerin alkollere etkisiyle elde edilen bir bileşik olan “ester” kelimelerinden türemiştir. PET Polyester; alkol, etilen glikol (EG), asit ve teraftalik asit (TPA)’ten meydana gelmiş olup kimyasal ismi Polietilen Tereftalat (PET)’tir. PET’i oluşturan hammaddeler ham petrolden elde edilir. Rafine işlemlerinden sonra, ham petrol çeşitli petrol ürünlerine dönüştürülür ve sonuçta iki tane PET hammaddesi elde edilir. Bu hammaddeler arıtıldıktan sonra, bir katalizör yardımıyla kanal şeklindeki bir fırında 300 °C’ye kadar ısıtılır. Kimyasal reaksiyon sırasında oluşan çok sayıdaki tekil moleküller (monomerler) birbirleriyle ester bağlarıyla birleşerek polimerleri oluştururlar (Akçaözoğlu, 2008). Resim 1’de PET atıkları görülmektedir.



Resim 1. PET Atıkları (URL-1)

Atık PET’lerin Beton Üretiminde Geri Dönüşümü

Birçok ülkedeki geri dönüşümle ilgili kanunlarda, çevre kirliliğini ve kaynak israfını önlemek amacıyla, plastik atıkların yeniden kullanılarak geri kazanılması,

diğer kaynaklar arasında öncelikli olarak belirlenmiştir. Resim 2’de atık Polietilen Tereftalat (PET)’lerin geri dönüşüm için hazırlanması görülmektedir.



Resim 2. PET şişelerin geri dönüşüm için hazırlanması (URL-2)

Beton üretimi için oldukça büyük miktarda malzemeye gereksinim duyulur. Bu sebeple, PET atıkların beton üretiminde agrega olarak kullanılması, bu atıkların yok edilmesi açısından önemli bir kullanım alanı oluşturmaktadır. Son 20 yılda bu konuda yapılan çalışmalar artış göstermektedir. Bu atıkların değerlendirildiği endüstrilerin başında inşaat sektörü gelmektedir. Plastik tozlarının ve kırıklarının beton katkısı veya agregası olarak kullanılması yeni bir uygulamadır. Shulman (1996), mikronize Polistren köpük parçalarını hafif beton katkısı olarak kullanmış ve patent almıştır. Malloy ve ark. (2001)’nın bildirdiğine göre, Schroeder (1994) yüksek yoğunluklu Polietilenle bir kısım ince agregayı yer değiştirerek hafif beton karışımı elde etmiştir. Yüksek yoğunluklu Polietilen granülleri içeren beton, daha düşük basınç dayanımına sahiptir, fakat doygunluk değeri daha fazladır. Atık plastiklerin polimer betonu üretiminde kullanılması da son yıllarda önemli konulardan biri haline gelmiştir. İlk polimer beton kompoziti olan polimer emdirilmiş beton, geniş bir kullanım alanına ulaşmıştır. Bu polimer betonu, hidrate Portland çimento betonuna düşük kıvamlı monomer emdirilerek üretilmiştir. 1950’lerden itibaren kullanılan polimer modifiyeli beton ise, Portland çimentosu ve polimer modifiye kullanılmasıyla elde edilmektedir (Gavela ve ark., 2004).

Atık Petlerin Hafif Beton Üretimi için Agrega Olarak Geri Dönüşümü

İnşaat teknolojisinin vazgeçilmez malzemesi olan beton yapımı için çok miktarda mineral agregaya ihtiyaç duyulmaktadır. Atık plastiklerin hafif betonda agrega olarak kullanılmasıyla, hem doğal agregadan tasarruf edilmiş olunmaktadır, hem de atık plastiklerin ekonomik olarak geri dönüşümü sağlanmaktadır. Atık PE şişelerden elde edilen hafif agregalar sıcak bir mikserde yüksek fırın cürufu ile birlikte karıştırılarak, agrega yüzeyinin cüruf ile üniform bir şekilde kaplanması sağlanmıştır. Deneylerde kullanılan, küresel şeklindeki

hafif agregâ ve bu agregânın kesiti Resim 3’de gösterilmiştir. Karışımlarda PET agregalar doğal agregalarla %25, %50 ve %75 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, hafif agregânın özgül ağırlığının ve hacim yoğunluğunun, doğal agregadan %50 oranında düşük olduğu gözlenmiştir. Hafif agregalı betonun işlenebilirliğinin ikame ve su-çimento oranlarının artırılmasıyla iyileştirilebileceği belirtilmektedir. Yüksek fırın cürufunun hafif agregâ yüzeyine yapışmasının, agregâ yüzeyinin güçlenmesine katkıda bulunduğu gözlenmiştir (Akçaözoğlu, 2008).



Resim 3. a) Hafif agregânın şekli b) Hafif agregânın kesiti (Choi ve ark., 2005)

Shehata ve ark. (1996), granül haldeki plastik, cam ve fiberölas atıklarını ince agregayla %5-20 oranlarında yer değiştirerek beton üretiminde kullanmışlardır. Araştırmada kullanılan plastik atıklar, PET şişelerden ve süt şişelerinde kullanılan yüksek yoğunluklu Polietilen (HDPE)’den oluşmaktadır. Beton numuneler, bu agregâ türlerinden her seferinde yalnızca biri kullanılarak üretilmiştir. Numuneler üzerinde basınç, eğilme ve yarmada çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Beton numunelerin basınç ve yarmada çekme dayanımlarının, kırılma ve elastisite modülleri kadar iyi olduğu gözlenmiştir. Elektron mikroskopuyla tarama yöntemiyle, beton numunelerin mekanik özellikleri ile kesitlerin mikro yapısı arasında ilişki kurulmaya çalışılmıştır.

Araştırma sonucunda, cam ve fiberölas agregaların, plastik agregalara oranla çimento hamuruna daha iyi yapıştıkları gözlenmiştir. Atık plastik, cam ve fiberölas kırıklarının, çimentolu bileşenlerde kumla kısmi olarak yer değiştirilerek kullanılmasının mümkün olduğu belirtilmiştir.



Resim 5. Atık PET ile üretilen betonun yakından görünüşü (Asokan ve ark., 2008)

Al-Maneer ve Dala (1997), yaptıkları laboratuvar deneylerinde, araba tamponlarından elde edilen atık plastik agregalı hafif beton üretimi üzerinde çalışmışlardır. %10-50 arasındaki çeşitli oranlarda plastik agregası içeren betonun 28 günlük basınç dayanımının 19-48 MPa arasında; çekme dayanımının 3.2-6.5 MPa arasında olduğunu belirtmişlerdir. Karışımındaki plastik miktarı arttıkça yoğunluk azalmaktadır. Plastik agregaların kullanılmasıyla, betonun daha fazla sünek davranış gösterdiği saptanmıştır ve bu özelliğinin betonda çatlak oluşumunun azaltılması açısından avantajlı olacağı düşünülmektedir. Resim-5’de atık PET ile üretilen betonun yakından görünüşü verilmiştir. Resim-6’da ise atık PET’lerden yapılmış birikimler görülmektedir.



Resim 6. Atık PET'lerden yapılmış biriketler (URL-3)

Atık PET'lerin Lif Takviyeli Beton Üretiminde Geri Dönüşümü

Özellikle asbest liflerin yasaklanmasından sonra, lif takviyeli harçlar ve betonlar üzerindeki çalışmalar giderek artmıştır. Liflerin harç ve betonlara eklenmesi; gerilme dayanımı, elastisite modülü ve tokluk gibi birçok özelliği iyileştirebilmektedir. Lif takviyeli harç ve beton üretmek için birçok sentetik lif kullanılmaktadır. Polipropilen (PP), Polietilen (PE), Polietilen Tereftalat (PET), Nylon, ve Polyester bunlara örnek olarak verilebilir. PET lifler, polyester grubuna girmektedir ve tamamen bozunması yüz yıldan fazla zaman alan geri dönüşümlü PET şişelerden elde edilmektedirler (Resim 7). Bu sebeple, atık PET liflerin çimento bazlı malzemeler içinde kullanılması, çevre korunması açısından da yarar sağlamaktadır.



Resim 7. Parçalanmış PET'lerden elde edilen lifler

PET lifler monofilament formda kullanılmaktadırlar, su geçirmezler ve Portland çimentosunun hidrasyonu üzerinde etkileri yoktur. Bununla birlikte, Portland çimentosu içindeki PET liflerin dayanıklılığı hakkında bir fikir birliği söz konusu değildir. Bazı araştırmacılara göre, polyester lifler Portland çimentosu içine girdiğinde bozunmaktadırlar. Bazı araştırmalarda ise, PET lif takviyeli harç ve betonların performansının çok iyi olduğu savunulmaktadır. Silva ve ark. (2005), Portland çimento bazlı malzemeler içinde kullanılan geri dönüşümlü PET liflerin dayanıklılık özelliklerini incelemişlerdir. PET lifler üzerinde gerçekleştirilen kızılötesi ve mikroskopik analizler ve mekanik testler neticesinde; geri dönüşümlü PET liflerin Ca(OH)_2 ve Lawrence çözeltileriyle etkileşime girdiği, yüzeylerinin pürüzlü hale geldiği ve “alkalin tereftalat” adı verilen bir çökelti oluştuğu görülmüştür. PET liflerin beton karışımının %0.4-0.8'i oranlarında kullanıldığı durumlarda; harçların basınç, gerilme ve eğilme dayanımları üzerinde etkisinin olmadığı gözlenmiştir.

Liflerin harç içinde bozunmasından dolayı, zamanla sertlikte azalma görülmektedir. Elektron mikroskopuyla tarama sonuçlarına göre, incelenen tüm liflerdeki yüzey pürüzlülüğünün aynı olduğu, bazı bölgelerde ise liflerin tamamen bozulduğu gözlenmiştir. Özel ve ark. (2011), sabit su/çimento oranında (0.55) ve iki farklı çimento tipi (CEM II/B-M (P-LL) 32.5 N ve CEM I 42.5 R) kullanılarak hazırlanmış karışımlarda polipropilen fiberlere (PPF) alternatif olarak endüstriyel atık olan polietilen tereftalat'ların (PET) betonda kullanılabilirliği araştırılmışlardır. Üretilen betonlarda, agrega yerine farklı oranlarda kullanılan PET'lerin betonun taze ve sertleşmiş özellikleri üzerindeki etkisi PPF'li betonlarla karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Yapılan araştırmada atık PET ilavesi ile elde edilen betonların mekanik ve fiziksel özelliklerindeki azalmalar, PPF'li betonlardaki azalmalara göre daha az olduğu tespit edilmiştir. Atık PET'ler bu özellikler açısından kullanılabilir olduğu gibi, PET'lerin çevreye

verdiği zararını azaltmak, geri dönüşüm maliyetini azaltmak ve beton maliyeti düşürmek için beton imalatlarında kullanılabilir olduğu belirtilmiştir.

Atık PET'lerin Betonda Sentetik Hafif Agregada veya Bağlayıcı Olarak Geri Dönüşümü

Jansen ve ark. (2001), sentetik hafif agreganın beton içinde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada yüksek yoğunluklu Polietilen (PE) ve karbon içeriği %12 olan uçucu kül kullanılmıştır. Maksimum agregada boyutu 9.5 mm olan ve uçucu kül içeriği %0, %35 ve % 80 olan çeşitli agregalar üretilmiştir. Agregalar, ısıtma yöntemleri; plastiklerin uçucu kül partiküllerini sarması sağlanarak üretilmektedir. Karşılaştırma amaçlı olarak, geliştirilmiş killi hafif agregada ve normal ağırlıklı agregalar da kullanılmıştır. Agregaların gradasyonu, özgül ağırlıkları ve su emme kapasiteleri incelenmiştir. Çeşitli kaba agregada türleriyle beş tip beton numune hazırlanmıştır. Sentetik agregaların basınç ve çekme dayanımlarının, normal ağırlıklı agregalara ve geliştirilmiş killi hafif agregalara göre daha düşük olduğu görülmüştür. Sentetik hafif agregalı betonların elastisite modülü oldukça düşük bulunmuştur, fakat süneklik derecelerinin yüksek olduğu belirtilmiştir. Sentetik hafif agregaların uçucu kül içeriği arttıkça, betonun bütün özelliklerinin iyileştiği gözlenmiştir. Uçucu kül oranı % 80 olan sentetik hafif agregaların zararlı tuzlara karşı dayanımlarının oldukça yüksek olduğu belirtilmektedir (Akçaözoğlu, 2008).

Atık PET'lerin Polimer Betonu Reçinesi Olarak Geri Dönüşümü

Polimer betonu veya polimer harcı geleneksel çimento harç ve betonundaki çimento bağlayıcıların polimerle kısmi olarak yer değiştirmesiyle yapılmaktadır. Çimento esaslı malzemelerle karşılaştırıldığında, geleneksel reçinelerin yüksek maliyetinden dolayı, polimer betonu üretilme maliyeti oldukça yüksek olmaktadır. Oysa, geri dönüşümlü plastik polimerlerin kullanılması, reçine üretme maliyetini düşürmek açısından oldukça önem taşımaktadır (Rebeiz ve ark. 1991). Polimer harç ve betonlarda kullanılan sıvı reçinelerin başlıcaları; epoksi reçinesi (EP), doymamış polyester reçinesi (UP), vinil ester (VE) ve akrilik reçinedir. Polimer beton yapımında en sık tercih edilen reçine, doymamış polyester reçinesidir. Atık PET şişeler, çeşitli kimyasal işlemlerden geçirilerek doymamış polyester reçinesi yapımında kullanılabilir. Abdel (1996), PET atıklardan elde ettikleri polyester reçineleri kullanarak polimer betonu üretimi üzerinde çalışmıştır. Elde edilen polyesterler, stiren monomeri içinde eritilmiş ve kür davranışları incelenmiştir. Bu reçinelerden yapılan polimer betonlarının basınç dayanımları da incelenmiştir. Bu bilgilere dayanarak, geri dönüşümlü PET tabanlı polimer betonuyla, reçine hammaddeli polimer betonunun özellikleri karşılaştırılmıştır. Araştırmacı, PET atıkların reçine yapımında kullanılmasının, reçine elde etme maliyetini düşürmek ve çevresel problemleri azaltmak açısından yararlı olabileceğini savunmaktadır. Tawfik ve Eskander (2006), atık PET şişeleri polyester reçinesi yapımında kullanarak, dayanıklı bir polimer betonu üretmeyi

amaçlamışlardır. Dolgu malzemesi olarak mermer atıklar ve doğal bazalt kullanılmıştır. Araştırma sonucunda, atık PET şişelerden ve atık mermerden üretilen ve hızlı küre tabi tutulan polimer betonunun fiziksel ve mekanik özelliklerinin tatminkar düzeyde olduğu görülmüştür. Üretilen kompozit malzemenin kimyasal karakteristiklerinin ve donma-çözülme direncinin oldukça yüksek olduğu belirtilmektedir. Atık PET şişelerin polyester reçinesi yapımında kullanılmasıyla üretilen polimer betonunun endüstriyel uygulamalarda kullanılmasıyla, ekonomik ve ekolojik yönlerden avantaj sağlanacağı düşünülmektedir.

Rebeiz ve Fowler (1996), geri dönüşümlü PET gibi atık plastik esaslı doymamış polyester reçineli ve çelik takviyeli polimer betonun eğilme davranışı ve dayanım tahminleri üzerinde çalışmışlardır. Kirişlerin çoğu, çekme bölgesinde tek çelik çubukla takviye edilmiştir. Çok az kiriş hem çekme hem de basınç bölgesinde olmak üzere çift çelik çubukla takviyelidir. Deney sonuçları, geri dönüşümlü polyester reçineli takviyeli polimer betonunun eğilme dayanımında oldukça iyi değerler elde edilebileceğini göstermiştir.

Atık PET'lerin Asfalt Betonunda Agregası Olarak Geri Dönüşümü

Atık plastiklerin geri dönüşümde etkin bir şekilde kullanıldığı başlıca iki endüstri dalı, ulaşım ve yapım endüstrileridir. Ulaşım endüstrisinde, yüksek dayanımlı beton gerektirmeyen özel uygulamalarda kullanılabilir. Yapım endüstrisinde ise geri dönüşümlü malzemelerin kullanım alanları çok çeşitlidir (Shehata, 1996). 1 km yol yapmak için yaklaşık 12500 ton agregaya ihtiyaç vardır. Doğal agreganın sadece %5 oranında PET agregayla yer değiştirilmesiyle, 1 km yol yapmak için 625 ton doğal agregadan tasarruf edilecek ve yerine 315 ton atık PET kullanılarak geri dönüşümde değerlendirilmiş olacaktır. Böylece, atık PET'lerin yok edilmek üzere toplandığı 9450 m³ çöp alanının kullanılmasına gerek kalmayacaktır (Hassani ve ark. 2005). Agregalar, asfalt beton yollarda en önemli bileşenlerden birisidir. Atık PET şişe kırıklarının asfalt betonunda kullanılması, atıkların geri dönüşümde kullanılmasının yanı sıra; doğal agregası kullanımının azaltılması, doğal kaynakların korunması, taş ocağından malzeme getirme maliyetinin düşürülmesi, çevre ve gürültü kirliliğinin azaltılması gibi açılardan da yarar sağlayacaktır. Hassani ve ark. (2005), PET atıkların çevreye verdiği zararları azaltmak ve doğal agregadan tasarruf etmek amacıyla, PET şişe kırıklarının asfalt betonunda agregası yerine kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada, agregası boyutuna eşit boyuttaki (2.36 - 4.75 mm) atık PET taneleri doğal agregayla %20-%60 oranında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Tüm karışımlarda %6.6 oranında bitüm kullanılmıştır. Araştırma sonucunda, PET'in agregası olarak kullanıldığı karışımın akıcılık değerinin kontrol betonundan daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bu özelliklerdeki asfalt karışımının pratik uygulamalar için uygun olduğu belirtilmektedir. Resim 8'de plastik atıklar kullanılarak inşa edilen yol kaplaması görülmektedir.



Resim 8. Plastik atıklar kullanılarak inşa edilen yol kaplamaları (URL-4).

Atık PET'lerin Diğer Geri Dönüşüm Alanları

Yukarıda saydığımız kullanım alanları dışında atık PET'ler bütün hali ile ev ve duvar yapımında da değerlendirilmektedir. Resim 9'da atık PET'lerden yapılmakta olan duvar ve ev örnekleri görülmektedir.



Resim 9. Atık PET şişelerden duvar ve ev yapımı örnekleri (URL-2, URL-5).

Sonuçlar

İnşaat sektörünün vazgeçilmez malzemesi olan beton üretimi için mineral agregaya gereksinim duyulmaktadır. Alternatif agregaya kaynaklarından biriside atık PET'ler olarak karşımıza çıkmaktadır. PET'ler geri dönüştürülmüş hali ile ulaşım ve yapım işlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaya başlamıştır. Ulaşım işlerinde, çok yüksek dayanımlı beton gerektirmeyen uygulamalarda kullanılabilmekte, yapım endüstrisinde ise geri dönüşümlü plastiklerin kullanım alanları çeşitlilik kazanmaktadır. Geri kazanılmış atık PET'ler, hafif beton agregası olarak başarılı bir şekilde kullanılabilir. Bu şekilde doğal agregadan tasarruf edilmekte ve plastiklerin ekonomik olarak geri dönüşümü sağlanmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda, PET kullanılarak üretilen betonun net ağırlığında düşüş görülmüştür. Günümüzde PET agreganın kullanılmasıyla ilgili çalışmalar yapılmaya devam etmektedir.

Bu çalışmada geri dönüşümlü atık PET'lerin yapım işlerinde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Atık PET katılmış betonunun; yollar, kaldırımlar, köprüler, döşemeler ve çatılarda, hasar görmüş çimentolu beton yüzeylerin onarım ve kaplama işlerinde, ev, duvar ve yol yapımı gibi uygulamalarda kullanılabileceği görülmüştür.

Kaynaklar

- Abdel-Azim, 1996. Unsaturated polyester resins from poly (ethylene terephthalate) waste for polymer concrete. *Polymer Engineering and Science*, December 1996, v 36, no 24, pp.2973-2977.
- Akçaözoğlu, S., 2008. Atık pet şişe kırıklarının hafif beton agregası olarak kullanılabilirliği. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi. Adana, 257s.
- Al-maneeer, A.A., Dala, T.-R., 1997. Concrete containing plastic aggregates. *Concrete International*, v 19, no 8, pp.47-52.
- Asokan, P., Osmani, M., Price, A.,D., F. 2009. Assessing the recycling potential of glass fibre reinforced plastic waste in concrete and cement composites, *Journal of Cleaner Production*, volume 17, issue 9, pages 821-829.
- Choi, Y.-W., Moon, D.-J., Chung, J-S, Cho, S.-K., 2005. Effects of waste pet bottles aggregate on the properties of concrete. *Cement and Concrete Research* 35, pp.776-781.
- Gavela, S., Karakosta C., Nydriotis, C., Kaselouri-Rigopoulou, V., Kolas, S., Tarantılı, P. A., Magoulas, C., Tassios, D., Andreopoulos, A., 2004. A study of concretes containing thermoplastic wastes as aggregates. RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures, Barcelona, Spain. pp 911-918.
- Hassani, A., Ganjidoust, H., Maghanaki, A.A., 2005. Use of plastic waste (polyethylene terephthalate) in asphalt concrete mixture as aggregate replacement. *Waste Management & Research*, no 23, pp.322-327.
- Jansen, D.C., Kiggins, M.L., Swan, C.W., Malloy, R. A., Kashi, M.G., Chan, R.A., Javdekar, C., Siegal, C., Weingram, J., 2001. Lightweight fly ash-plastic aggregates in concrete. *Transportation Research Record*, no 1775, pp.44-52.
- Malloy, R., Desai, N., Wilson,C., Swan, C., Jansen, D., Kashi, M., 2001. High carbon fly ash / mixed thermoplastic aggregate for use in lightweight concrete. Society of Plastics Engineering, Annual Technical Conference, Dallas, TX, v 47, pp. 2743-2751.
- Ohama, Y, 1997. Recent progress in concrete-polymer composites, *Advanced Cement Based Materials*, Volume 5, Issue 2, March 1997, Pages 31-40 v 5, pp.31-40.
- Özel, C., Filiz, M., Sevinç, A., Kıran, C., 2011. Betonda fiber katkı olarak polietilen tereftalatın kullanılabilirliğinin araştırılması, Süleyman Demirel Üniversitesi Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, cilt 3, sayı 2, sayfalar 17 – 28.
- Pehlivan, E., Ünal, S., Tunçsiper, B., 2004. Plastik ambalaj malzemelerinin hayatımızdaki yeri ve bunların geri kazanılması ve azaltımında çağdaş

yöntemler. POLSEM 2004, Polimer İşleme ve Geri Kazanımı Sempozyumu, Mersin, s.114-128.

Rebeiz, K.S., Fowler, D.W., Paul, D.R., 1991. Making polymer concrete with recycled pet. *Plastics Engineering*, v 47, no 2, pp.33-34.

Rebeiz, K.S., Fowler, D.W., 1996. Flexural strength of reinforced polymer concrete made with recycled plastic waste. *ACI Structural Journal*, v 93, no 5, pp.524-530.

Schroeder, R., 1994. The use of recycled materials in highway construction. *Public Roads*, 58, 2, pp.32-41.

Shehata, I., Shahram, V., Elsayy, A., Fahmy, M., 1996. The use of solid waste materials as fine aggregate substitutes in cementitious concrete composites. *Semisequicentennial Transportation Conference Proceedings*, Iowa State University, Iowa, 5p.

Shulman, D., M., 1996. Lightweight cementitious compositions and methods of their production and use. United States Patent, patent number: 5580378

Silva, D.A., Betioli, A.M., Gleize, P.J.P., Roman, H.R., Gomez, L.A., Ribeiro, J.L.D., 2005. Degradation of recycled pet fibers in Portland cement-based materials. *Cement and Concrete Research* 35, pp.1741-746.

Tawfik, M. E., Eskander, S. B., 2006. Polymer concrete from marble wastes and recycled poly (ethylene terephthalate). *Journal of Elastomers and Plastics*, v 38, pp.65-79.

URL-1<<http://inovatifkimyadergisi.com>

URL-2<<http://tiroz.org>

URL-3<<https://www.archdaily.com>

URL-4<<http://www.plasticscrap.us>

URL-5<<https://inhabitat.com>

BÖLÜM 33

Nesnelerin İnterneti (İot) İçin Güvenli Veri Akışı Tasarımı

Salih Erdurucan¹ & Ayhan Aydın²

¹ Ankara University, Nallıhan Vocational School, Computer Programming Program, 06920 Nallıhan, Ankara, ORCID: 0000-0002-1061-7712

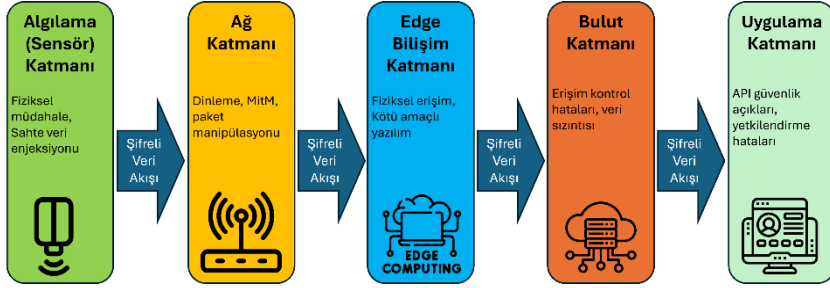
² Ankara University, Nallıhan Vocational School, Computer Programming Program, 06920 Nallıhan, Ankara, ORCID: 0000-0001-7938-0509

1. Nesnelerin İnternetinin Günümüzdeki Yeri

Nesnelerin İnterneti (Internet of Things – IoT), fiziksel çevrede yer alan nesnelerin algılama, iletişim kurma ve işlem gerçekleştirme yetenekleri kazanarak dijital ağlara bağlanmasını mümkün hâle getiren kapsamlı bir teknoloji alanı olarak değerlendirilmektedir. IoT'nin bu bağlamda yalnızca mevcut bilgi teknolojilerinin genişletilmesi şeklinde ele alınması yeterli olmayıp, fiziksel dünya ile dijital ekosistem arasında doğrudan etkileşim kurarak geleneksel sınırları ortadan kaldıran dönüşümsel bir anlayış sunduğu vurgulanmaktadır. Literatürde bu yaklaşımın, sağlık hizmetlerinden akıllı ulaşım altyapılarına, endüstriyel üretim hatlarından akıllı konut sistemlerine, tarımsal uygulamalardan kritik altyapı servislerine kadar geniş bir alanda yeni veri temelli çözümler oluşturduğu ifade edilmektedir (Atzori ve ark., 2017; Gubbi ve ark., 2013). Sensör teknolojisinin küçülmesi, kablosuz iletişim standartlarının çeşitlenmesi, düşük enerjili gömülü sistemlerin gelişmesi ile bulut ve edge bilişim yaklaşımlarının yaygınlaşması, IoT'nin küresel ölçekte hız kazanmasını sağlayan temel bileşenleri oluşturmaktadır. Bu eğilim doğrultusunda günümüzde dünya çapında milyarlarca cihaz, IoT ekosisteminin parçası hâline gelerek sürekli veri üreten ağ bileşenlerine dönüşmüştür.

IoT uygulamalarının bu denli büyük hacme ulaşması, yalnızca cihaz sayısındaki artışla sınırlı olmayıp, veri üretim miktarında, sistemler arası bağımlılıkta, yazılım altyapılarında ve ağ topolojilerinde önemli düzeyde karmaşıklık oluşmasına da neden olmaktadır. Dolayısıyla IoT, bir yandan gerçek zamanlı karar verme süreçlerini optimize ederek farklı sektörlerde verimlilik sağlayan geniş bir potansiyel ortaya koyarken, diğer yandan veri gizliliği, sistem bütünlüğü, erişilebilirlik, güvenilirlik ve altyapı emniyeti gibi konularda çok yönlü güvenlik problemleri oluşturma kapasitesine sahiptir (Sicari ve ark., 2020). Özellikle sensörlerin ürettiği verinin yanlış, manipüle edilmiş ya da kesintiye uğramış biçimde sisteme ulaşması, gerçek zamanlı uygulamalarda ciddi operasyonel problemler meydana getirebilmektedir. Örneğin sağlık alanında kullanılan IoT tabanlı izleme sistemlerinde hatalı sensör çıktıları, kritik hastaların yanlış veriyle değerlendirilmesine sebep olabileceği gibi; enerji şebekesinde yer alan IoT cihazlarının devre dışı kalması, geniş bölgelerde elektrik kesintilerine yol açabilmekte; akıllı ulaşım sistemlerinde veri bütünlüğünün bozulması ise şehir içi trafik akışını ciddi şekilde olumsuz etkileyebilmektedir. Bu tür örnekler IoT güvenliğinin yalnızca teknik bir konu olarak görülmemesi, aynı zamanda toplumsal güvenlik, kamu hizmetleri ve stratejik yönetim açısından da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

IoT mimarisinin temel özelliği çok katmanlı bir yapıya sahip olmasıdır ve veri akışı sensör katmanında başlayarak uygulama katmanında sonuçlanan ardışık bir süreç üzerinden ilerlemektedir.



Şekil 14 IoT sistemlerinde sensör katmanından uygulama katmanına kadar uzanan güvenli veri akışı ve katman bazlı temel güvenlik risklerinin genel görünümü

IoT literatüründe yaygın kabul gören katman modeli kapsamında sistem; algılama katmanı (perception layer), ağ katmanı (network layer), işleme/hesaplama katmanı (processing layer – edge/cloud), uygulama katmanı (application layer) ve bazı sınıflandırmalarda ayrıca iş zekâsı katmanı olmak üzere değerlendirilmekte; bu katmanların her biri kendi içinde özel güvenlik gereksinimlerine sahiptir (Zhang ve ark., 2021). Katmanlar arasındaki veri akışının hem dikey hem yatay ekseninde tehditlere açık olduğu, sensör katmanının fiziksel saldırılara ve sahte veri enjeksiyonu girişimlerine karşı oldukça savunmasız olduğu, ağ katmanının dinleme ve paket manipülasyonuna maruz kalabildiği, edge katmanının sahada fiziksel erişim nedeniyle kötü amaçlı yazılım yüklenmesi riskini barındırdığı, bulut katmanının erişim yönetiminde yapılabilecek hatalar nedeniyle veri sızıntılarına açık olduğu ve uygulama katmanının kimlik doğrulama ile API güvenliği eksiklikleri nedeniyle saldırı yüzeyini genişlettiği literatürde vurgulanmaktadır (Roman ve ark., 2018; Shi ve ark., 2020).

Bu çok katmanlı mimarinin varlığı, IoT güvenliğinin klasik bilgi sistemlerinden ayrılan temel niteliğini oluşturmaktadır. Geleneksel bilişim mimarilerinde güvenlik çoğunlukla belirli bir ağ topolojisi ve merkezi sunucular üzerinden yapılandırılırken, IoT’de farklı üreticilere ait cihazların standart dışı protokollerle çalışması, işlem gücü kısıtları, bağlantı süreksizlikleri, enerji kısıtları, mobilite ve heterojen mimari yapıları güvenliği çok daha karmaşık hâle getirmektedir (Khan ve ark., 2020). Bu nedenle IoT güvenliği yalnızca yazılım güvenliği ile sınırlandırılmaz; veri bütünlüğü, cihaz kimlik doğrulaması, saldırı tespiti, yetkilendirme, gizlilik ve güvenli iletişim gibi çok boyutlu güvenlik mekanizmalarının birlikte değerlendirilmesi zorunludur.

IoT sistemlerinin güvenlik gereksinimleri değerlendirilirken dikkate alınması gereken temel yaklaşımlardan biri CIA güvenlik modelidir. Gizlilik (Confidentiality), bütünlük (Integrity) ve erişilebilirlik (Availability) ilkeleri, IoT sistemlerinin her bir katmanında farklı saldırı türleri tarafından tehdit altına alınmaktadır. Gizlilik özellikle kablosuz iletişim protokollerinin yaygınlığı nedeniyle ihlal riskine açıktır. Sensör verilerinin manipülasyonu bütünlüğü doğrudan zayıflatmakta ve IoT tabanlı uygulamalarda yanlış kararların alınmasına neden olabilmektedir. Ayrıca DDoS tabanlı saldırılar erişilebilirliği hedef alarak sistemlerin çalışmasını tamamen durdurabilmektedir (Raza ve ark., 2019). Bu nedenle IoT güvenliği, yalnızca kriptografik önlemlerin uygulanmasıyla sağlanamaz; sistem mimarisinin baştan güvenlik ilkelerini destekleyecek biçimde tasarlanması gerekmektedir.

IoT tehdit ortamında giderek artan çeşitlilik ve karmaşıklık, tehdit modelleme çalışmalarını daha da önemli hâle getirmiştir. STRIDE modeli, IoT sistemlerine yönelik saldırı türlerinin sınıflandırılmasında sıkça tercih edilmektedir. Buna ek olarak Zero Trust mimarisi IoT ağlarında varsayılan güvenin tamamen ortadan kaldırılmasını esas almakta ve her işlem için kimlik doğrulama yapılmasını gerektirmektedir (Rose ve ark., 2020). Aynı şekilde NIST'in IoT güvenlik çerçeveleri, güvenli yazılım güncelleme, güçlü kimlik doğrulama, veri minimizasyonu ve güvenli başlatma gibi kavramları zorunlu bileşenler olarak önermektedir.

IoT güvenliğinin önemini artıran bir diğer unsur, saldırıların ölçeklenebilir nitelik taşımasıdır. Klasik bilgi sistemlerinde tek bir saldırı çoğu zaman yalnızca belirli hedefleri etkilerken, IoT yapılarında saldırılar aynı anda binlerce cihaz üzerinde sonuç doğurabilmekte ve geniş çaplı kesintilere yol açabilmektedir. Örneğin Mirai botnet saldırısı incelendiğinde, dünyanın farklı noktalarında yer alan yüz binlerce IoT cihazının kontrol altına alındığı ve büyük çaplı hizmet kesintileri yaşandığı bilinmektedir (Raza ve ark., 2019).

Son yıllarda IoT güvenliği alanında geliştirilen teknolojik yaklaşımlar arasında güçlü kriptografi algoritmaları, blockchain tabanlı doğrulama mekanizmaları, edge tabanlı saldırı tespit sistemleri ve yapay zekâ destekli anomali analiz yöntemleri dikkat çekmektedir (Dorri ve ark., 2017; Yang ve ark., 2019). Ancak IoT ekosisteminin oldukça heterojen bir yapıya sahip olması, farklı üreticilere bağlı cihazların birlikte çalışabilirlik eksikliği ve standart yetersizlikleri nedeniyle bütüncül güvenlik mimarisi oluşturmayı güçleştiren bir unsur olarak değerlendirilmektedir.

2. IoT Veri Akışının Yöntemsel Olarak Değerlendirilmesi

Bu bölümde sunulan çalışma, IoT veri akışının güvenlik gereksinimlerini teknik, mimarî ve yönetsel boyutlarıyla birlikte değerlendiren bütüncül bir yöntemsel çerçeveye dayanmaktadır. Bu yöntemsel yaklaşımda amaç, IoT ekosistemine ilişkin güvenlik sorunlarının yalnızca tek bir katmandan ya da tek bir teknoloji türünden ibaret olmadığını, aksine sensör katmanından bulut altyapısına kadar tüm bileşenlerde farklı güvenlik gereksinimlerinin var olduğunu ortaya koymaktır. Araştırma kapsamında tercih edilen yöntem, ağırlıklı olarak nitel değerlendirmelere dayalı olmakla birlikte, kuramsal analiz, disiplinler arası modelleme, literatür odaklı inceleme, katman bazlı değerlendirme ve karşılaştırmalı çözümleme gibi yöntemsel bileşenleri içermektedir. Bu yaklaşım, IoT'nin yapısal ve işlevsel çeşitliliği göz önünde bulundurularak oluşturulmuştur. Araştırmada hareket noktasını oluşturan temel varsayım, IoT güvenliğinin klasik bilgi güvenliği modellerinden farklı dinamiklere sahip olduğu ve bu nedenle çok katmanlı bir inceleme gerektirdiğidir (Atzori ve ark., 2019; Gubbi ve ark., 2013).

Çalışmanın ilk aşaması, IoT mimarisi ve güvenlik tehditlerine ilişkin literatürün kapsamlı biçimde incelenmesini içermektedir. Bu kapsamda Atzori ve ark. (2019) tarafından ortaya konulan IoT mimarî bileşenleri, Gubbi ve ark. (2013)'ün IoT'nin gelişim sürecini açıklayan yaklaşımı ile Sicari ve ark. (2020)'nin IoT güvenliği ve gizlilik sorunlarına yönelik kapsamlı açıklamaları çalışmanın temel kaynakları arasında değerlendirilmiştir. Söz konusu literatür incelemesi sonucunda IoT sistemlerinin sensör katmanı, ağ geçidi katmanı, edge bilişim katmanı, bulut altyapısı ve uygulama katmanı olmak üzere beş temel bileşenden oluştuğu ve güvenli veri akışının sağlanmasının bu katmanların her birinde eş zamanlı olarak ele alınması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Araştırmanın ikinci aşamasında IoT'nin katman temelli yapısının güvenlik bakış açısıyla detaylı biçimde analiz edildiği bir inceleme gerçekleştirilmiştir. Sensör katmanının fiziksel saldırılara ve sahte veri girişlerine son derece duyarlı olduğu ve bu nedenle veri akışının en kırılgan bileşeni olarak değerlendirilmesi gerektiği ortaya konmuştur (Zhang ve ark., 2021). Ağ katmanında kablosuz iletişimin yaygın olarak kullanılması nedeniyle özellikle paket dinleme, Man-in-the-Middle saldırıları ve kimlik sahteciliği gibi saldırı türlerinin çok sık karşılaşılan tehditler arasında yer aldığı belirlenmiştir (Roman ve ark., 2018). Edge bilişim katmanında ise fiziksel erişim olanaklarının fazla olması nedeniyle edge cihazlarının kötü amaçlı yazılım yüklemeye ve yetki kötüye kullanımı gibi tehditlere açık olduğu görülmüştür (Shi ve ark., 2020). Bulut katmanında yüksek ölçekte veri depolanması avantaj sağlayan bir unsur olmakla birlikte API güvenliği, erişim kontrol hataları ve bulut yapılandırma eksiklikleri ciddi riskler

oluşturabilmektedir (Sicari ve ark., 2020). Uygulama katmanı ise kullanıcı doğrulama eksiklikleri, API yönetimi sorunları ve yetki kontrol hataları nedeniyle geniş bir saldırı yüzeyi sunmaktadır.

Katman temelli güvenlik değerlendirmesinin ardından araştırma kapsamında klasik bilgi güvenliği modellerinin IoT'ye uyarlanabilirliği analitik bir yaklaşımla ele alınmıştır. Bu bağlamda CIA modeli (gizlilik, bütünlük, erişilebilirlik), veri akışının gerektirdiği temel güvenlik özelliklerini açıklamak üzere metodolojik bir temel oluşturmuştur. IoT cihazlarının sınırlı işlem gücü nedeniyle özellikle güçlü kriptografi yöntemlerinin uygulanmasında zorluk yaşanması, gizlilik ilkesini risk altına sokmaktadır (Khan ve ark., 2020). Bütünlük ilkesi, sahte veri üretimi ve veri manipülasyonu saldırıları nedeniyle zayıflayabilmekte; erişilebilirlik ilkesi ise Mirai benzeri geniş ölçekli botnet saldırıları nedeniyle büyük tehdit oluşturmaktadır (Raza ve ark., 2019). STRIDE modeli ise IoT sistemlerinde görülen saldırı türlerinin sınıflandırılması amacıyla kullanılmış; özellikle spoofing, tampering ve bilgi sızıntısı gibi tehditlerin her katmanda farklı etki düzeylerine sahip olduğu ortaya konmuştur (Shostack, 2014). Zero Trust mimarisi ise IoT ekosisteminin oldukça heterojen olması nedeniyle varsayılan güven yaklaşımıyla çelişen yapıyı ele alan etkili bir güvenlik modeli olarak değerlendirilmiştir (Rose ve ark., 2020).

Yöntem kapsamında veri akışı modellemesi de gerçekleştirilmiştir. Sensör katmanından bulut altyapısına kadar ilerleyen veri döngüsü, grafiksel bir modelleme ile analiz edilmiştir. Bu modelleme çalışması sonucunda veri akışının doğrusal bir zincir olmaktan çok, birbirleriyle sürekli etkileşim içinde bulunan katmanlar ağından oluştuğu görülmüştür. Sensör katmanında kriptografik sınırlılıklar, ağ katmanında protokol uyumsuzlukları, edge katmanında işlem yükü ve saldırı tespit mekanizmaları, bulut katmanında erişim yönetimi hataları ve uygulama katmanında API güvenliği eksiklikleri bu modellemenin kritik bileşenlerini oluşturmuştur. Veri akışındaki kesintilerin hangi noktalarda meydana gelebileceğine ilişkin çizimlerin elde edilmesi, bulgular bölümünde yer alan değerlendirmelerin temelini oluşturmuştur.

Araştırmanın diğer aşamasında karşılaştırmalı analiz yöntemi benimsenmiştir. IoT sistemlerinde kullanılan kriptografi ve iletişim protokollerinin güvenli veri akışını doğrudan etkilemesi nedeniyle AES, ECC, RSA, PRESENT, SPECK gibi şifreleme algoritmaları işlem kapasitesi, enerji tüketimi ve saldırı dayanıklılığı açısından karşılaştırılmıştır (Bogdanov ve ark., 2007; Beaulieu ve ark., 2015). Benzer şekilde MQTT, CoAP, LoRaWAN ve HTTPS gibi iletişim protokolleri hem güvenlik düzeyleri hem saldırı yüzeyleri hem de kaynak kullanımı açısından literatür verilerine göre değerlendirilmiştir (Higgins ve ark., 2021; Shelby ve ark., 2014). Bu karşılaştırmalar sonucunda IoT'de kullanılan teknik bileşenlerin güçlü

ve zayıf yönlerinin belirlenmesi ve buna bağlı güvenli mimarî tasarımı oluşturulması hedeflenmiştir.

Bu araştırmanın yöntemsel sınırlılığı, deneysel doğrulamanın doğrudan laboratuvar koşullarında değil, literatür incelemeleri ve mevcut araştırma sonuçlarının değerlendirilmesi yoluyla yapılmış olmasıdır. Kriptografik performans analizleri laboratuvar testlerine dayanmamakta, standartlar ve mevcut çalışma sonuçları ışığında yürütülmektedir. Aynı şekilde blockchain tabanlı kimlik doğrulama ve Zero Trust gibi mimarî yaklaşımlar prototip uygulamalardan ziyade konsept düzeyinde değerlendirilmiştir. Bununla birlikte yöntemsel modelleme, IoT güvenliğinin çok katmanlı yapısını açıklamak açısından kapsamlı bir çerçeve sunmakta ve hem kuramsal hem pratik araştırmalara temel oluşturmaktadır.

3. Yöntemlerden Elde Edilen Bulgular

Bu bölümde elde edilen bulgular, IoT veri akışının güvence altına alınmasının çok katmanlı ve çok boyutlu bir yaklaşım gerektirdiğini ortaya koymuştur. IoT mimarisi genel olarak sensör katmanı, ağ geçidi katmanı, edge bilişim katmanı, bulut altyapısı ve uygulama katmanı olmak üzere birbirleriyle etkileşim hâlinde çalışan bileşenlerden oluşmaktadır. Bu katmanların her biri farklı güvenlik sorunlarıyla karşı karşıya olmakta ve veri akışındaki zafiyetlerin büyük çoğunluğu zincirleme bir etki oluşturarak tüm sistemin güvenliğini zayıflatabilmektedir. Bu nedenle güvenliğin yalnızca tek bir bileşende sağlanması yeterli olmayıp, uçtan uca bir güvenlik yaklaşımı zorunlu hâle gelmektedir.

Çalışma kapsamında ulaşılan ilk bulgu, IoT sistemlerinde sensör katmanının sistemin en savunmasız bileşenlerinden biri olduğudur. Sensörler genellikle düşük maliyetli donanımlara dayanan, basit işlem kapasitesine sahip cihazlardan oluştuğu için hem fiziksel hem yazılımsal saldırılara karşı hassas yapıdadır. Ayrıca sensörlerin büyük çoğunluğunun sahada fiziksel erişime açık noktalara yerleştirilmesi, saldırganların cihazlara fiziksel müdahalede bulunmasını ve sensörlerin çalışmasını manipüle etmesini mümkün kılmaktadır. Bununla birlikte sensör yazılımlarının kötü amaçlı biçimde değiştirilmesi veya sensör verisine sahte bilgi eklenmesi durumunda sistem daha ilk aşamada veri bütünlüğünü kaybedebilmektedir. Sensörün ürettiği veride meydana gelen bu tür bütünlük bozulmaları yalnızca tek bir cihazı değil, edge katmanında gerçekleştirilen veri işleme süreçlerini, bulut katmanındaki analiz algoritmalarını ve uygulama katmanındaki karar verme mekanizmalarını doğrudan etkilemekte ve tüm sistemin yanlış kararlar almasına yol açabilmektedir. Bu nedenle sensör katmanının korunmasının IoT güvenliği açısından temel bir öncelik taşıdığı sonucuna ulaşılmıştır.

Ağ katmanına ilişkin bulgular, IoT sistemlerinde en çok karşılaşılan saldırı türlerinin bu katmanda ortaya çıktığını göstermektedir. Kablosuz iletişim temelli protokollerin yoğun olarak kullanılması, saldırganlar açısından geniş bir saldırı yüzeyi oluşturmaktadır. Bu protokoller üzerinde gerçekleşen dinleme (sniffing) faaliyetleri, paket manipülasyonu, Man-in-the-Middle (MitM) saldırıları ve paketlerin tekrar gönderilmesine dayanan (replay) saldırılar ağ katmanında en sık gözlemlenen tehditler arasında yer almaktadır. Özellikle replay saldırıları, daha önce iletilmiş bir mesajın tekrar gönderilerek sistemin yanlış veriyle yönlendirilmesine yol açabilmekte ve kritik kontrol komutlarının bulunduğu ortamlarda büyük güvenlik riskleri doğurabilmektedir. MitM saldırılarında ise saldırgan sensör ile ağ geçidi arasındaki veri akışını kesintiye uğratmakta veya veriyi değiştirebilmektedir. Bu tür tehditler nedeniyle ağ katmanında güçlü kimlik doğrulama mekanizmalarının kullanılması, bütünlük doğrulama yöntemlerinin uygulanması ve iletişim trafiğinin şifreleme teknikleriyle korunması zorunlu hâle gelmektedir.

Edge bilişime ilişkin bulgular, bu katmanın IoT güvenliği açısından hem potansiyel avantajlar hem de önemli tehditler barındırdığını ortaya koymaktadır. Edge cihazları, sensörlerden gelen veriyi yerelde işlemeye imkân tanıtarak veri akışının erken aşamasında güvenlik ihlallerini tespit etme potansiyeli sunmaktadır. Böylece saldırıların bulut katmanına ulaşmadan engellenmesine olanak sağlanmakta ve veri akışının daha güvenilir hâle gelmesi mümkün olmaktadır. Bununla birlikte edge cihazlarının sahada bulunması nedeniyle fiziksel olarak erişilebilir olması, saldırganların bu cihazlar üzerinde kötü amaçlı yazılım yükleme veya yetki dışı işlem gerçekleştirme girişimlerini kolaylaştırmaktadır. Edge üzerinde çalışan model ve yazılımların değiştirilmesi durumunda ise sistemin genel çalışma davranışının manipüle edilmesi mümkün olabilmektedir. Bu nedenle edge katmanında güçlü kimlik doğrulama mekanizmalarının kullanılması, güncelleme sistemlerinin güvenli hâle getirilmesi ve yetki yönetiminin doğru biçimde yapılandırılması gerekmektedir.

Bulut katmanına ait bulgular, IoT güvenliğinin en kritik bileşenlerinden birinin veri depolama ve işlem altyapısı olduğunu göstermektedir. Bulut, yüksek işlem kapasitesi sayesinde IoT verilerinin analiz edilmesi noktasında merkezi bir avantaj sunmakla birlikte, geniş bir saldırı yüzeyine sahip olması nedeniyle riskli bir yapı teşkil etmektedir. Yanlış yapılandırılan bulut depolama alanları saldırganların erişimine açık hâle gelebilmekte ve büyük hacimli IoT verilerinin kötü niyetli kişilerin eline geçmesine yol açabilmektedir. API güvenliği ile ilgili zafiyetler, yetkisiz kişilerin bulut kaynaklarına erişim sağlamasına neden olabilmektedir. Bu nedenle bulut katmanında güvenli erişim kontrolü, kimlik yönetimi, veri şifreleme ve sürekli izleme mekanizmalarının uygulanması

gerekmektedir. Ayrıca bulut altyapısının tek bir noktada yoğunlaşması merkezi güvenlik risklerini artırdığı için çoklu bölgelerde veri kopyalanması ya da hibrit mimarilerin tercih edilmesi önerilmektedir.

Uygulama katmanında yapılan değerlendirmeler, IoT sistemlerinin kullanıcıyla doğrudan etkileşim kurduğu bu katmanda da önemli güvenlik açıklarının bulunduğunu göstermektedir. IoT uygulamalarında kullanılan API anahtarlarının yanlış saklanması, açık bırakılması veya yetki kontrollerinin doğru biçimde yapılandırılmaması durumunda saldırganlar uygulama üzerinden sistem bileşenlerine erişebilmektedir. Kullanıcı doğrulama süreçlerinin yetersiz olması, oturum çalma, yetki yükseltme ve hesap ele geçirme gibi saldırıların ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Uygulama katmanında güvenlik açısından en büyük problemlerden biri, geliştiricilerin yoğunlukla işlevselliği öncelerken güvenlik tasarımını ikinci planda değerlendirmesidir. Bu nedenle IoT uygulamalarında API güvenliği, kimlik doğrulama ve yetki yönetimi süreçlerinin bütünlük biçimde ele alınması zorunludur.

Kriptografiye ilişkin bulgular, IoT cihazlarında kullanılan şifreleme algoritmalarının performans ve güvenlik arasında bir denge kurmak zorunda olduğunu ortaya koymaktadır. Sınırlı işlem gücüne sahip IoT cihazlarının güçlü kriptografi tekniklerini kullanamaması gizlilik ilkesi açısından önemli bir risk oluşturmaktadır. Asimetrik şifreleme yöntemleri yüksek güvenlik vaat etmesine rağmen yüksek işlem maliyeti nedeniyle IoT cihazlarında her durumda uygulanamayabilmekte; bu durum hibrit kriptografik yaklaşımları zorunlu hâle getirmektedir. Bu nedenle IoT güvenliğinde kullanılacak kriptografi yaklaşımının cihaz türüne, enerji kapasitesine ve uygulama alanına göre seçilmesi gerekmektedir.

Protokol güvenliği bulguları, IoT iletişim protokollerinin büyük çoğunluğunun hafiflik odaklı tasarlandığını ve bu nedenle güvenlik seviyelerinin standart ağ protokollerine kıyasla daha düşük olduğunu göstermektedir. TLS veya DTLS gibi güvenlik mekanizmalarının protokollere entegre edilmesi güvenlik seviyesini artırabilmekte; ancak bu entegrasyon bazı IoT cihazları için enerji ve performans açısından kabul edilemez sonuçlara neden olabilmektedir. Bu nedenle protokol güvenliğinin IoT ekosisteminde cihaz odaklı ve koşul temelli olarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

Modern güvenlik yaklaşımlarına ilişkin bulgular ise IoT sistemlerinde dayanıklılığın artırılabilmesi için yeni nesil mimarilerin entegrasyonunun zorunlu olduğunu göstermektedir. Blockchain tabanlı mimariler, IoT cihazlarının kimlik doğrulama süreçlerini güçlendirebilmekte ve veri bütünlüğünü koruyabilmektedir (Dorri ve ark., 2017). Zero Trust mimarisi, heterojen IoT ekosistemlerinde varsayılan güven yaklaşımını ortadan kaldırarak sistemin her

aşamasında doğrulama yapılmasını gerektirmektedir (Rose ve ark., 2020). Yapay zekâ temelli anomali tespit sistemleri ise IoT veri akışındaki olağan dışı davranışları tanıyarak saldırıların erken aşamada tespit edilmesini mümkün hâle getirmektedir.

Genel olarak ele alındığında, sensör katmanından uygulama katmanına kadar ortaya çıkan herhangi bir güvenlik zafiyeti tüm IoT sisteminin işleyişini bozabilmekte ve domino etkisi oluşturarak sistemin bütünlüğünü olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle IoT güvenliği yalnızca teknik önlemlerle değil, mimarî, yönetimsel ve operasyonel bileşenlerle birlikte ele alınması gereken çok yönlü ve sürekli güncellenmesi gereken bir konu olarak değerlendirilmektedir.

4. IoT'nin Gelecekteki Yeri

Nesnelerin İnterneti (IoT) mimarisinin küresel çapta yaygınlaşması sonucunda, veri akışının güvenli biçimde sağlanması yalnızca teknik bir gereklilik olmaktan çıkarak ekonomik, toplumsal ve stratejik sonuçları bulunan bir zorunluluk hâline gelmiştir. Bu bölümde yer alan değerlendirmeler, IoT veri akışının sensörlerden uygulama katmanına kadar uzanan çok katmanlı bir yapı içinde gerçekleştiğini göstermiş; her katmanın kendine özgü güvenlik tehditlerine sahip olması nedeniyle yerel düzeyde alınan önlemlerin tek başına yeterli olamayacağı ortaya konmuştur. Dolayısıyla IoT güvenliğine yönelik çözüm arayışlarının yalnızca cihaz güvenliğini önceleyen teknik yaklaşımlar yerine, mimarî, yönetsel, süreçsel ve politika temelli bileşenlerden oluşan bütüncül bir güvenlik çerçevesi üzerinden şekillendirilmesi gerekmektedir (Atzori ve ark., 2019; Roman ve ark., 2018).

Çalışma kapsamında ulaşılan bulgular, IoT sistemlerinde güvenli veri akışının sağlanmasının çok katmanlı bir sorumluluk alanı olduğunu göstermektedir. Algılama katmanında fiziksel tehditler öncelikli risk alanı olarak ortaya çıkarken, ağ katmanı dinamik ve karmaşık saldırı türlerine açık hâle gelmektedir. Edge katmanı veri ön-işleme süreçlerinin yoğun biçimde gerçekleştiği bir alan olduğundan hem avantaj hem de risk taşımakta; bulut katmanı geniş ölçekte depolama ve analiz kabiliyeti nedeniyle saldırılar açısından cazip bir hedef oluşturmaktadır. Uygulama katmanında ise API güvenliği, erişim denetimi, kimlik doğrulama ve yetkilendirme süreçlerinin belirleyici olduğu görülmektedir. Bu katmanlardan herhangi birinin yeterince korunmaması durumunda, IoT veri akış zinciri zayıflamakta ve saldırganlar sistemdeki en zayıf noktayı hedef alarak tüm veri akışını bozabilmektedir (Raza ve ark., 2019).

Bu çalışma içerisinde ulaşılan en önemli sonuçlardan biri, IoT güvenliğinin yalnızca bir “şifreleme sorunu” olarak ele alınamayacağıdır. Aksine IoT

güvenliği mimarî bütünlük, süreç yönetimi, cihaz kimliği, protokol güvenliği, güncelleme mekanizmaları ve yetki politikaları gibi çok boyutlu unsurların aynı anda değerlendirilmesini gerektirmektedir. Yalnızca AES veya ECC gibi kriptografik yöntemlerin uygulanması, saldırı risklerini ortadan kaldırmak için yeterli olmayabilir; çünkü güvenlik mimarisi içerisinde anahtar yönetimi, erişim politikaları, kimlik doğrulama ve cihaz yaşam döngüsü gibi süreçlerin de güvenlik ile bütünleşecek biçimde tasarlanması gerekmektedir. Ayrıca RSA gibi geleneksel yöntemler yüksek güvenlik sunmalarına rağmen IoT cihazlarının düşük işlem gücü nedeniyle uygulamada sınırlı kalmakta; ECC ve hafif kriptografi mekanizmalarının daha uygun çözümler sağladığı görülmektedir (Khan ve ark., 2020).

Protokol güvenliği açısından değerlendirildiğinde MQTT, CoAP ve LoRaWAN gibi IoT iletişim protokollerinin temel olarak hafiflik odaklı tasarlandığı ve bu nedenle güvenlik seviyelerinin standart bilgisayar ağ protokollerine göre daha düşük olduğu bilinmektedir. Bu nedenle TLS veya DTLS gibi güvenlik katmanlarının entegrasyonu zorunlu hâle gelebilmekte, ancak bu süreçler bazı IoT cihazlarında performans kaybına veya kaynak tüketiminde artışa neden olabilmektedir. Bununla birlikte IoT yapısının heterojen niteliği nedeniyle tek bir protokol uygulamasının tüm sistem için yeterli olmayacağı, çok protokollü ağlarda güvenliğin segment bazında sağlanması gerektiği değerlendirilmektedir.

Modern mimarî yaklaşımlar IoT güvenliğine önemli katkılar sağlamaktadır. Özellikle edge bilişim, verinin saldırıya uğramadan önce yerelde işlenmesine imkân tanıyarak gecikmeyi azaltmakta ve saldırı tespit mekanizmalarını hızlandırmaktadır. Blockchain yaklaşımları ise IoT cihaz kimlik doğrulamasında ve veri bütünlüğünün korunmasında yenilikçi çözümler sunmakta; veri bloklarının değiştirilemez yapısı IoT veri akışında yapılan işlemlerin doğrulanmasını kolaylaştırmaktadır (Dorri ve ark., 2017). Zero Trust mimarisi heterojen IoT yapılarında varsayılan güven ilkesini ortadan kaldırarak saldırı yüzeyini daraltmakta ve her işlem için doğrulama gerektirmektedir (Rose ve ark., 2020).

Bu bölümde ulaşılan teorik bulgular, IoT güvenliğinin gelecekte yapay zekâ tabanlı yaklaşımlar ile daha etkili biçimde yönetilebileceğini göstermektedir. Anomali tespit sistemleri, davranışsal analizler, makine öğrenmesi destekli ağ izleme modelleri, özellikle geniş ölçekli IoT ağlarında saldırıların erken aşamada fark edilmesini mümkün hâle getirmektedir. Bu tür yaklaşımlar edge cihazlarına entegre edildiğinde, merkezi bulut yükü azalmakta ve saldırıların tespit edilme süresi önemli ölçüde kısalmaktadır.

IoT güvenliğinin sağlanması yalnızca teknik tedbirlerle sınırlı olmayıp; yönetim, politika geliştirme ve standartlaştırma süreçlerinin de IoT mimarisinde kritik bir rol oynadığı anlaşılmaktadır. Güvenlik standartlarının oluşturulması, üreticilerin zorunlu güvenlik sertifikasyon süreçlerine tabi tutulması, yazılım güncellemelerinin güvenli olarak dağıtılması ve cihazların yaşam döngüsünün izlenmesi IoT güvenliğinin sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda ulusal ve uluslararası kuruluşların IoT güvenliği standartları geliştirmesi (örneğin NIST IoT Cybersecurity Framework, ETSI IoT Security Guidelines vb.) IoT güvenliğinin yalnızca teknik değil aynı zamanda regülasyon temelli bir süreç olduğunun göstergesidir.

Gelecek araştırmalar açısından değerlendirme yapıldığında, IoT cihazlarına uygun ultra hafif kriptografi algoritmalarının geliştirilmesi, otonom kimlik yönetimi sistemlerinin oluşturulması, blockchain altyapılarının IoT ölçeğine uyarlanabilirliğinin artırılması ve yapay zekâ tabanlı güvenlik modellerinin edge cihazlarına entegre edilmesi öncelikli araştırma alanları arasında yer almaktadır.

Genel olarak yapılan değerlendirmeler, IoT veri akışında güvenliğin sağlanması için mimarî bütünlük, teknik derinlik ve süreç yönetimini bir arada içeren çok katmanlı bir yaklaşımın zorunlu olduğunu göstermektedir. Güvenli veri akışı IoT sistemlerinin güvenilirliğinin temel belirleyicisi hâline gelmiş; cihaz güvenliğinden ağ protokollerine, bulut mimarisinden Zero Trust yaklaşımlarına kadar çok çeşitli bileşenlerin eş zamanlı değerlendirilmesini gerektiren stratejik bir alan hâline dönüşmüştür. Bu kapsamda IoT sistemlerinin daha dayanıklı, sürdürülebilir ve güvenilir olması için bütünsel güvenlik mimarilerinin geliştirilmesi ve farklı güvenlik modellerinin birlikte uygulanması gerekmektedir.

KAYNAKÇA

- Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2017). Understanding the Internet of Things: Definition, potentials, and challenges. *Computer Networks*, 134, 93–118.
- Dorri, A., Kanhere, S. S., & Jurdak, R. (2017). Towards an optimized blockchain for IoT. *IEEE International Conference on Communications*, 1–6.
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things: A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645–1660.
- Higgins, H., O'Connor, N., & Pahl, C. (2021). Secure MQTT communication in IoT systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(6), 4459–4471.
- Khan, M. A., Salah, K., & Rehman, M. H. (2020). IoT security: Challenges, solutions and future directions. *Internet of Things*, 12, 100–121.
- Raza, S., Wallgren, L., & Voigt, T. (2019). Securing the Internet of Things. *IEEE Internet of Things Journal*, 1(2), 11–25.
- Roman, R., Lopez, J., & Mambo, M. (2018). Mobile edge computing, Fog and IoT security: A review. *Future Generation Computer Systems*, 78, 680–698.
- Rose, S., Borchert, O., Mitchell, S., & Connelly, S. (2020). NIST SP 800-207: Zero Trust Architecture. National Institute of Standards and Technology.
- Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2020). Edge computing: Vision and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(5), 637–646.
- Shostack, A. (2014). *Threat Modeling: Designing for Security*. John Wiley & Sons.
- Sicari, S., Rizzardi, A., Grieco, L., & Coen-Porisini, A. (2020). Security, privacy and trust in the Internet of Things. *Computer Networks*, 148, 134–154.
- Yang, Y., Wu, L., Yin, G., Li, L., & Zhao, H. (2019). A survey on security and privacy issues in Internet-of-Things. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(2), 2152–2174.
- Zhang, Z., Wang, Y., & Chen, X. (2021). A comprehensive survey on IoT security: Challenges and solutions. *ACM Computing Surveys*, 54(4), 1–36.
- Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2019). Understanding the Internet of Things. *Computer Networks*, 174, 107–118.
- Beaulieu, R. et al. (2015). The SIMON and SPECK lightweight block ciphers. *DAC Proceedings*, 1–6.
- Bogdanov, A. et al. (2007). PRESENT: An ultra-lightweight block cipher. *CHES*, 450–466.

- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things: A vision, architecture elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645–1660.
- Higgins, H., O'Connor, N., & Pahl, C. (2021). Secure MQTT communication in IoT environments. *IEEE IoT Journal*, 8(6), 4459–4471.
- Khan, R. et al. (2020). Future Internet: IoT architecture, security and privacy considerations. *IJACSA*, 30(2), 50–60.
- Perrig, A. et al. (2002). SPINS: Security protocols for sensor networks. *Wireless Networks*, 8(5), 521–534.
- Raza, S. et al. (2019). Security protocols for the Internet of Things. *IEEE IoT Journal*, 1(2), 11–25.
- Roman, R., Lopez, J., & Mambo, M. (2018). Mobile edge computing security threats. *Future Generation Computer Systems*, 78, 680–698.
- Rose, S. et al. (2020). Zero Trust Architecture (NIST SP 800-207).
- Shelby, Z., Hartke, K., & Bormann, C. (2014). CoAP (RFC 7252).
- Shi, W. et al. (2020). Edge computing: Vision and challenges. *IEEE IoT Journal*, 3(5), 637–646.
- Shostack, A. (2014). *Threat Modeling*. Wiley.
- Sicari, S. et al. (2020). Security, privacy and trust in IoT. *Computer Networks*, 148, 53–84.
- Zhang, Z., Wang, Y., & Chen, X. (2021). Survey on IoT security: Challenges and solutions. *ACM Computing Surveys*, 54(4), 1–36.

BÖLÜM 34

Kimyasal ve Elektrokimyasal Enerji Dönüşümleri

Elif Yıldızlılar¹ & Ahmet Yönetken²

¹ Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, ORCID:0009-0000-5891-7012

² Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, ORCID: 000-0003-1844-7233

Giriş

Enerji depolama, sürdürülebilir enerji sistemlerinin sürekliliği açısından kritik öneme sahiptir. Elektrik doğrudan depolanamadığından, enerji çoğunlukla kimyasal, mekanik veya elektrokimyasal biçimlere dönüştürülerek depolanır [1]. Kimyasal enerji atomlar arası bağlarda depolandığı için uzun vadeli depolama uygulamalarında önemli bir avantaj sunar.

Kimyasal enerji depolama teknolojileri; fosil yakıtlar, biyoyakıtlar, hidrojen ve sentetik yakıtlardan oluşan dört ana grupta incelenmektedir [2]. Bu seçenekler arasında hidrojen, yüksek enerji yoğunluğu ve sıfır karbon salınımıyla öne çıkan çevreci bir taşıyıcıdır.

Elektrokimyasal sistemler (lityum-iyon piller, süperkapasitörler) kısa süreli enerji ihtiyaçlarında etkili çözümler sunarken, kimyasal depolama daha uzun süreli ve yüksek kapasiteli uygulamalar için tercih edilir [5]. Yenilenebilir kaynakların süreksizliğini gidermede bu iki yaklaşım birbirini tamamlar.

Kimyasal enerjiye dönüşüm aynı zamanda taşınabilirlik ve arz güvenliği açısından avantaj sağlar. Rüzgâr ve güneş gibi değişken kaynaklardan elde edilen elektriğin kimyasal forma dönüştürülmesi sürdürülebilir bir strateji oluşturur. Bu bağlamda hidrojen, enerji sektöründe “evrensel enerji taşıyıcısı” olarak değerlendirilmektedir [2].

1. Hidrojen Yöntemiyle Kimyasal Enerji Depolama

1.1. Hidrojenin Enerji Taşıyıcısı Olarak Önemi

Hidrojen, yaklaşık 120 MJ/kg özgül enerji yoğunluğu ve sıfır karbon emisyonlu kullanımı sayesinde geleceğin enerji sistemlerinde önemli bir enerji taşıyıcısıdır [1]. Yanma ürünü yalnızca su olduğu için çevre dostudur ve hem yakıt hücrelerinde elektrik üretiminde hem de ısı uygulamalarında kullanılabilir.

Yenilenebilir elektrikle elektroliz yoluyla üretilen yeşil hidrojen, elektriğin kimyasal enerjiye dönüştürülmesini sağlayarak şebeke dengeleme ve karbon nötr enerji üretimi açısından kritik bir çözümdür [2].

Ayrıca literatürde hidrojenin biyokütle ve karbon bazlı süreçlerle bütünleşmiş SNG üretiminde verimliliği artırdığı ve metanol–amonyak sentezi gibi kimyasal süreçlerde sektörler arası entegrasyonu desteklediği gösterilmiştir [3], [4].

1.2. Hidrojen Üretim Süreçleri

Hidrojen üretimi temel olarak iki kaynaktan elde edilir: yenilenemeyen kaynaklar ve yenilenebilir enerji kaynakları [2], [3], [4].

A) Yenilenemeyen Kaynaklardan Üretim

Hidrojenin yenilenemeyen kaynaklardan üretimi yüksek karbon salımına neden olur ve endüstride kullanılan geleneksel yöntemleri oluşturur. En yaygın yöntem olan buhar reformlamada metan, yüksek sıcaklıkta su buharıyla reaksiyona girerek hidrojen ve sentez gazı üretir. Kömür ve petrolün kısmi oksidasyonuna dayanan gazlaştırma da sentez gazı sağlar ancak çevresel etkileri nedeniyle eleştirilir. Su elektrolizi ise kullanılan elektrik fosil kaynaklıysa dolaylı olarak bu kategoriye girer [2].

B) Yenilenebilir Kaynaklardan Üretim

Yenilenebilir kaynaklardan hidrojen üretimi, düşük karbon ayak izine sahip “yeşil hidrojen”in temelidir. Güneş PV, rüzgâr veya jeotermal kaynaklardan elde edilen elektrik su elektrolizinde kullanılarak temiz hidrojen üretilir. Güneş termal (termoliz) yöntemi ise yoğunlaştırılmış güneş enerjisiyle $>2500\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıklara ulaşarak suyu doğrudan H_2 ve O_2 'ye ayrıştırır. Ayrıca biyokütle kökenli atıklar mikrobiyal veya termokimyasal süreçlerle sürdürülebilir şekilde hidrojene dönüştürülebilir [2], [3].

Tablo 1. Hidrojen üretim yöntemlerinin karşılaştırılması [2,3,4]

Yöntem	Enerji Kaynağı	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	Verim (%)	Karbon Salımı	Teknoloji Düzeyi
Buhar Reformlama	Doğal Gaz	800–1000	65–75	Yüksek	Olgun
Elektroliz	Elektrik (yenilenebilir)	25–80	70–90	Düşük	Gelişmekte
Termoliz	Güneş Isısı	>2500	40–60	Yok	Ar-Ge
Biyokimyasal	Biyokütle	<100	40–50	Düşük	Gelişmekte

Tablo 1 incelendiğinde, elektroliz yönteminin karbon salınımının en düşük olduğu, buna karşın termoliz yönteminin yüksek sıcaklık gereksinimi nedeniyle hâlen araştırma aşamasında olduğu görülmektedir.

1.3. Hidrojen Depolama Yöntemleri

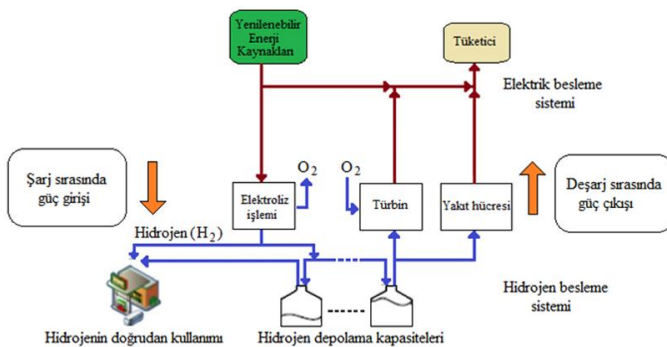
Hidrojenin enerji sistemlerinde etkin biçimde kullanılabilmesi yalnızca üretim süreçlerine değil, aynı zamanda güvenli ve ekonomik depolama tekniklerine de bağlıdır [2]. Hidrojen, düşük yoğunluklu bir gaz olduğu için doğrudan depolanması zordur. Bu nedenle hem fiziksel hem de kimyasal depolama yöntemleri geliştirilmiştir [5].

1.3.1. Fiziksel Depolama Yöntemleri

Gaz fazında depolamada, 350–700 bar basınç altında kompozit tanklarda gerçekleştirilir. Yüksek basınç nedeniyle sızdırmazlık ve mekanik dayanım kritik öneme sahiptir [1]. Sıvı fazında depolamaya bakılacak olursa 20,3 K (-252,9 °C) sıcaklıkta sıvılaştırılmış hidrojen, kriyojenik tanklarda depolanır. Bu yöntem yüksek yoğunluk sağlasa da sıvılaştırma enerjisi yüksek olduğu için ekonomik açıdan sınırlayıcıdır [2].

1.3.2. Kimyasal Depolama Yöntemleri

Metal hidrürler (MH), Mg, Ti veya LaNi₅ gibi metallerin hidrojenle bileşik oluşturmasıyla çalışır ve ısıtma ile hidrojen serbest bırakılır. Kimyasal taşıyıcılara bakıldığında amonyak, metanol ve LOHC gibi bileşikler hidrojenin kimyasal formda taşınmasını sağlar [3]. Karbon esaslı malzemelerde ise grafen, karbon nanotüp ve aktif karbon gibi malzemeler adsorpsiyon yöntemiyle hidrojen tutabilir [4].



Şekil 1. Hidrojen enerji depolama sistemlerinin şematik gösterimi [2].

Hidrojen yaklaşık 120 MJ/kg enerji yoğunluğuyla benzinden (≈ 44 MJ/kg), dizelden (≈ 45 MJ/kg) ve doğal gazdan (≈ 55 MJ/kg) belirgin şekilde daha yüksek bir performans sunmaktadır [1], [2]. Ayrıca bu yakıtlar sırasıyla yaklaşık 3.2, 3.1 ve 2.8 kg CO₂/kg düzeyinde karbon salımı üretirken, hidrojenin karbon emisyonu sıfırdır [1], [2]. Bu karşılaştırma, hidrojenin gelecekte fosil yakıtların yerini alabilecek güçlü ve çevre dostu bir enerji taşıyıcısı olduğunu göstermektedir.

1.4. Hidrojenin Taşınması ve Dağıtımı

Hidrojen, üretim ve depolama noktalarından kullanım alanlarına ulaştırılırken yüksek difüzyon kabiliyeti, düşük molekül ağırlığı ve düşük yoğunluğu nedeniyle özel altyapı gerektirir. Taşıma biçimi, hidrojenin fiziksel hâline (gaz, sıvı veya

kimyasal bileşik) bağlı olarak farklılık gösterir [2]. Hidrojenin taşınmasında maliyet, güvenlik, enerji kaybı ve mesafe temel belirleyici parametrelerdir.

1.4.1. Gaz Fazında Taşıma

Gaz fazındaki hidrojenin taşınmasında en yaygın yöntem boru hatlarıdır. Kısa ve orta mesafelerde yüksek verimlilik sunan bu sistemler, 30–80 bar arası basınçta çalıştığından sızdırmazlık ve güvenlik kritik önem taşır [1]. Avrupa ve Japonya’da ise doğal gaz altyapısının hidrojenle birlikte kullanımı üzerine pilot çalışmalar yürütülmekte; bu kapsamda şebekeye %10–20 oranında H_2-CH_4 karışımı verilerek geçiş döneminde karbon emisyonlarının azaltılması hedeflenmektedir [1]. Boru hatlarına ek olarak, kısa mesafeli taşımalar için kompozit karbon fiber tüp treylerler ve mobil basınçlı tanklar tercih edilmektedir [1].

1.4.2. Sıvı Hidrojen Taşımacılığı

Sıvı hidrojen, $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’de kriyojenik tanklarda taşınır ve yüksek enerji yoğunluğu sayesinde uzun mesafe taşımaya uygundur [5]. Ancak sıvılaştırma süreci toplam enerjinin yaklaşık %30’unu tükettiği için ekonomik açıdan sınırlayıcıdır. Bu yöntem özellikle havacılık, uzay ve deniz taşımacılığı gibi yüksek enerji gerektiren alanlarda kullanılır. Termal kayıpları azaltmak amacıyla çift cidarlı ve vakum yalıtımlı özel tanklar tercih edilmektedir [5].

1.4.3. Kimyasal Taşıyıcılarla Dağıtım

Kimyasal taşıyıcı sistemleri, hidrojenin kararlı bileşikler hâlinde depolanmasını ve taşınmasını sağlar. Bu kapsamda amonyak (NH_3), metanol (CH_3OH) ve sıvı organik hidrojen taşıyıcıları (LOHC) en yaygın seçeneklerdir [3]. Amonyak, %17,6 H_2 içeriği ve oda sıcaklığında sıvı fazda bulunması sayesinde yüksek enerji yoğunluklu bir taşıyıcıdır. Metanol, yenilenebilir kaynaklardan üretilbildiği için çevreci olup kimyasal dönüşümle hidrojen elde edilir. LOHC sistemlerinde ise hidrojen, toluen veya benzen türevlerine bağlanır ve varış noktasında dehidrojenasyonla serbest bırakılır [4]. Mevcut yakıt altyapısıyla uyumlu olmaları bu teknolojilerin endüstriyel ölçekte tercih edilmesini sağlamaktadır.

1.5. Gelecek Perspektifi ve Hedefler

Hidrojen teknolojileri, karbon nötr enerjiye geçişte stratejik bir konuma sahiptir ve 2050’de küresel enerji talebinin yaklaşık %20’sinin hidrojen temelli çözümlerle karşılanması beklenmektedir [5]. Yeşil hidrojen için hedef; elektrolizör verimlerinin %80’in üzerine çıkarılması ve maliyetlerin 200 €/kW seviyesine düşürülmesidir [2], [5]. Depolamada metal hidrürlerin kapasitesinin

artırılması, CNT/grafen tabanlı adsorbanların geliştirilmesi ve LOHC verimliliğinin yükseltilmesi başlıca Ar-Ge alanlarıdır [2].

Japonya, Güney Kore, Almanya ve AB hidrojen altyapı yatırımlarına başlamış olup; Türkiye’de de yenilenebilir tabanlı hidrojen için Ar-Ge ve teşvik programları yürütülmektedir [1]. Sürdürülebilirlik açısından gri hidrojen süreçlerinde CCS entegrasyonu ve tüm değer zincirinin LCA temelli değerlendirilmesi gereklidir [3]. 2050 hedefleri; küresel üretimin 520 Mt H₂’ye çıkması, elektrolizör maliyetlerinin 150 €/kW’a düşmesi ve emisyonların %80 azaltılmasıdır [1], [2], [5].

2. SENTETİK DOĞAL GAZ (SNG)

Sentetik doğal gaz (SNG), ana bileşeni metan (CH₄) olan, bileşim ve yanma özellikleri bakımından konvansiyonel doğal gaza oldukça benzeyen bir enerji taşıyıcısıdır. SNG’nin en önemli avantajı, düşük karbonlu veya yenilenebilir kaynaklardan sentezlenebilmesi ve mevcut doğal gaz altyapısıyla (boru hatları, basınçlı depolama, türbin sistemleri) doğrudan uyumlu olmasıdır [6]. Bu nedenle SNG, enerji arz güvenliği, karbon nötrlüğü ve enerji sistemlerinde esneklik sağlama açısından stratejik bir role sahiptir[7].

Özellikle Power-to-Gas (PtG) konseptiyle birlikte, yenilenebilir elektrik kaynaklarından üretilen hidrojenin karbondioksitle metanasyona sokulması, enerji dönüşüm zincirinde elektrik ve gaz sektörlerini birbirine bağlayan önemli bir köprü görevi görmektedir [8].

2.1. Üretim Yöntemleri

SNG üretimi; termokimyasal (gazlaştırma + metanasyon), elektrokimyasal (Power-to-Gas, e-SNG) ve biyokimyasal (biyolojik metanasyon) olmak üzere üç ana kategoride sınıflandırılmaktadır [6,7].

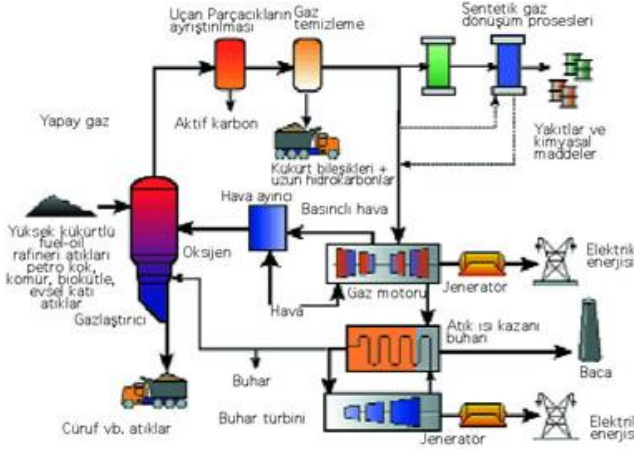
Her yaklaşımın çalışma sıcaklığı, basıncı, katalizör tipi, gaz kalitesi, karbon dönüşüm verimi ve ölçeklenebilirliği farklıdır [8,9]. Termokimyasal yöntemler genellikle yüksek sıcaklık ve basınçta katalitik metanasyon süreçlerine dayanırken, elektrokimyasal yöntemlerde yenilenebilir elektrikten üretilen hidrojenin CO₂ ile reaksiyona girmesi esas alınır [9,10]. Biyokimyasal yaklaşımlar ise düşük sıcaklıkta, mikroorganizmalar aracılığıyla gaz dönüşümünü hedefler [11].

2.1.1. Kömür ve Biyokütle Gazlaştırma + Metanasyon

Termokimyasal hatlarda kömür veya biyokütle, 700–1000 °C aralığında buhar ve/veya oksijen varlığında gazlaştırılarak CO, CO₂, H₂ ve N₂ içeren bir sentez gazına dönüştürülür [3], [4]. Elde edilen sentez gazı, katran, partikül, H₂S, NH₃

ve halojen türevlerinin uzaklaştırıldığı kapsamlı bir gaz temizleme ve şartlandırma sürecinden geçirilir [6].

Gaz temizleme adımlarının ardından sentez gazı, nikel esaslı katalizörler üzerinde $\text{CO} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$ ve $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ reaksiyonlarının yürütüldüğü metanasyon reaktörlerine beslenir [7]. Metanasyonun güçlü ekzotermik karakteri nedeniyle sıcak nokta oluşumu ve katalizör degradasyonunun önlenmesi kritik olup, bu amaçla çok kademeli adyabatik reaktörler arasında ara soğutma uygulanır veya yüksek ısıl iletkenliğe sahip izotermal/plate-type reaktör tasarımları tercih edilir [6].



Şekil 2. Termokimyasal SNG üretim sürecinin şematik gösterimi[1].

Biyokütle tabanlı sistemlerde soğuk gaz verimi genellikle %75–80, kömür tabanlı süreçlerde ise %60–70 aralığındadır; nihai CH_4 saflığı ise işletme koşullarına bağlı olarak %85–95 seviyelerine ulaşabilir [3], [6]. Bu değerler, hammadde türü, gazlaştırma sıcaklığı ve metanasyon basıncı gibi parametrelerin süreç performansını belirleyen kritik değişkenler olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 2 .Termokimyasal SNG üretiminde seçilmiş çalışma parametreleri ve sonuç özetleri [6, 7, 8]

Ham madde	Gazlaştırma T(°C)	Metanasyon P(bar)	Soğuk Gaz Verimi (%)	CH_4 içeriği (%mol)
Kömür	900–950	20–30	60–70	90–95
Biyokütle + CO_2 yakalama	800–850	15–25	65–70	85–90
Atık biyokütle	780–820	10–20	75–80	82–88

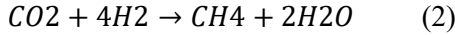
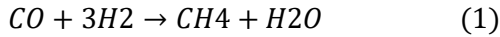
Tablo 2’de sunulan veriler, gazlaştırma sıcaklığındaki artışın soğuk gaz verimini düşürdüğünü, buna karşılık CH₄ içeriğini yükselttiğini göstermektedir [6], [7], [8]. Ayrıca biyokütle ve atık biyokütle esaslı sistemlerin, kömür tabanlı proseslere kıyasla daha düşük karbon ayak izine ve daha yüksek metanasyon seçiciliğine sahip olduğu görülmektedir [6], [8]. Bu bulgular, termokimyasal SNG üretiminde hammadde bileşimi, gazlaştırma sıcaklığı ve reaktör basıncı gibi tasarım parametrelerinin verim üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir.

2.1.2. Power to Gas (PtG) / e SNG

Power-to-Gas (PtG) sistemleri, yenilenebilir elektriğin elektroliz yoluyla hidrojene (H₂) ve ardından CO₂ ile metanasyona sokularak sentetik metana (e-SNG) dönüştürüldüğü entegre süreçlerdir. Bu yaklaşım, hem enerji depolama kapasitesini artırır hem de karbon döngüsünü kapatır [7]–[10].

Elektroliz aşamasında alkalın elektrolizör (AEL), proton değişim membranlı elektrolizör (PEM) ve katı oksit elektrolizör hücresi (SOEC) teknolojileri kullanılmaktadır. SOEC sistemleri yüksek sıcaklıklarda (700–800 °C) çalıştıkları için yüksek verim sunarken, PEM elektrolizörler hızlı yanıt verebilme özellikleri sayesinde değişken yenilenebilir enerji kaynaklarına daha uygundur [9], [10].

Üretilen H₂, CO₂ ile Sabatier reaksiyonları üzerinden metana dönüştürülür:



Bu ekzotermik reaksiyonlar nedeniyle metanasyon reaktörleri genellikle 250–400 °C aralığında çalışır ve ısı değiştiricilerle ısıl yönetim sağlanır. Açığa çıkan ısı elektrolizör ön ısıtması veya kojenerasyon amaçlı geri kazanılarak sistem verimi artırılır [8], [11].

H₂, kompresörlerde sıkıştırılarak depolama birimlerine yönlendirilirken; CO₂ akımı toplanıp metanasyon reaktörlerine beslenmektedir. Süreçte kullanılan çok kademeli metanasyon reaktörleri (MR1–MR4; Metanation Reactor) ile bunlara entegre ısı değiştiriciler (MHE1–MHE5; Metanation Heat Exchanger) sayesinde reaksiyon boyunca etkin ısı yönetimi sağlanır. Metanasyon sonrasında elde edilen ürün gazı, FLASH ünitesinde (flash buharlaştırma/yoğuşurma ünitesi) suyun uzaklaştırılması ve SNG Upgrading aşamalarında (Sentetik Doğal Gaz Saflaştırma Ünitesi) kurutma ve kalite kontrol işlemlerinden geçirilerek %95–98 saflıkta e-SNG üretilir. Nihai ürün doğal gaz şebekesine verilerek karbon nötr bir döngünün oluşturulmasına katkı sağlanır [8], [9], [12].

Bütünleşik PtG–e-SNG tesislerinde genel enerji dönüşüm verimi %60–70, ileri tasarımlarda ise %65–80 aralığındadır. Verim; elektroliz türü, CO₂ saflığı ve reaktör sıcaklık-basınç koşullarına bağlı olarak değişir [8], [9], [12].

2.1.3. Biyolojik Metanasyon

Biyolojik metanasyon, metanojen arkelerin 35–70 °C aralığında ve düşük basınçlarda yürüttüğü bir dönüşüm olup, kimyasal metanasyona kıyasla çok daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştiğinden enerji tüketimi düşüktür. Ancak gaz–sıvı kütle transferindeki sınırlamalar ve mikrobiyal kinetik faktörler nedeniyle reaksiyon hızları görece daha yavaştır [11], [12]. Bu nedenle verimliliği artırmak amacıyla mikro-baloncuk difüzörleri, trickle-bed tasarımları (gaz–sıvı akışlı katalizör yatağı reaktörü) ve membran destekli reaktörler gibi çeşitli mühendislik çözümleri kullanılmaktadır.

Metanojenik aktivitenin sürdürülebilmesi için H_2/CO_2 oranının yaklaşık 4:1 olması kritik önem taşır [11]. Güncel uygulamalarda ise biyolojik ve katalitik metanasyonun birlikte kullanıldığı hibrit sistemler geliştirilmiş olup, bu sayede süreç kararlılığı ve operasyonel verim daha da artırılmıştır [12].

Ex-situ biyolojik metanasyonda H_2 ve CO_2 , genellikle CSTR veya trickle-bed tipi reaktörlere beslenerek metanojen mikroorganizmalar tarafından metana dönüştürülür. Süreç boyunca düşük H_2 çözünürlüğü nedeniyle kütle transferi kritik olup, difüzörler, karıştırıcılar veya membran modülleri kullanılmaktadır. Ayrıca CO_2 tamponlama gereksinimi süreç stabilitesi açısından önemlidir. Reaksiyon ekzotermik özellik gösterdiğinden ısı yönetimi dikkate alınmalı ve optimum mikrobiyal aktivite 35–40 °C ile 55–65 °C aralıklarında sağlanmaktadır [11].

Tablo 3. Katalitik ve biyolojik metanasyonun temel karşılaştırması [11,12].

Özellik	Katalik Metanasyon	Biyolojik Metanasyon
Sıcaklık (°C)	250–400	35–70
Basınç (bar)	10–30	1–5
Enerji Verimi (%)	70–78	75–85

Katalitik metanasyon ise CO_2 ve H_2 'nin nikel veya rutenyum bazlı katalizörler üzerinde 250–400 °C ve 10–30 bar koşullarında yüksek hızla metana dönüştürüldüğü yüksek sıcaklıklı bir prostestir. Reaksiyon hızlı olmakla birlikte ısıl yönetim, katalizör zehirlenmesi ve malzeme dayanımı süreç tasarımında belirleyicidir [6], [7].

2.2. Depolama, Şebeke Entegrasyonu ve Kullanım Alanları

SNG, basınçlı gaz (CNG-SNG) veya kriyojenik sıvı (L-SNG) olarak depolanabilir ve doğal gaz şebekelerine enjekte edilebilir. Şebeke entegrasyonu için Wobbe indeksi, bağlı yoğunluk ve metan sayısının EN 16726 standardını karşılaması gerekir [9], [10].

SNG; elektrik üretimi, NGV yakıtı ve kimyasal sentezlerde (metanol, amonyak, H_2) çok yönlü bir kullanım sunar. Gaz kalitesinin korunması için çevrimiçi bileşim izleme, kokulandırma ve basınç dengeleme sistemleri uygulanır [9], [12].

Tablo 4. SNG'nin uygulama alanlarına göre gereksinim ve avantajları [9,12].

Kullanılan Alan	Enerji Yoğunluğu (MJ/m ³)	Ana Gereksinim	Öne Çıkan Avantaj
Elektrik üretimi	35–39	Yüksek CH ₄ saflığı	Yüksek termal verim, esnek yük takibi
NGV yakıtı	33–36	Kompresör/tank güvenliği	Düşük emisyon, yerinde dolum olanağı
Kimyasal hammadde	32–35	CH ₄ ≥ %95	Metanol, amonyak ve H ₂ zincirleri için girdi

Yüksek metan içeriği sayesinde SNG mevcut altyapıyla uyumludur ve elektrik-ısı üretiminde doğrudan kullanılabilir. Ayrıca CNG sistemlerine uygunluğu nedeniyle düşük emisyonlu bir ulaşım yakıtı olarak değerlendirilmektedir. Kimya endüstrisinde ise yüksek saflıktaki metan, metanol/amonyak üretimi ve Fischer–Tropsch sentezleri için önemli bir girdidir [9], [12].

2.3. Verimlilik, Ekonomi ve Çevresel Performans

SNG tedarik zincirinin verimi; üretim yöntemi, elektrik fiyatı, CO₂ arıtımı ve ısı entegrasyonuna bağlıdır. Termokimyasal süreçler %70–80, PtG/e-SNG sistemleri ise elektrolizör tipi ve entegrasyon düzeyine göre %70–85 verime ulaşır [9], [10], [12]. Düşük sıcaklıkta çalışan biyolojik metanasyon daha düşük enerji gerektirir ve uygun kütle transferinde benzer verimlere yaklaşabilir [11].

Ekonomik performans özellikle elektrik maliyetleri ve CO₂ saflığına bağlıdır. LCA (Life Cycle Assessment - Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi) analizleri, yenilenebilir elektrik oranı arttıkça SNG'nin iklim avantajının güçlendiğini; örneğin %80 yenilenebilir içerikli şebekelerde e-SNG'nin karbon ayak izinin fosil doğal gazı göre %70 daha düşük olduğunu göstermektedir [9], [12].

PtG sistemleri H₂'nin CO₂ ile metanasyona uğratılmasıyla karbon nötr e-SNG üretir; ancak yüksek sermaye maliyeti ve elektrik fiyatlarına duyarlılık önemli sınırlayıcılardır. Biyolojik metanasyon ise %75–85 verim sunar fakat düşük reaksiyon hızları ve kütle transfer sorunları nedeniyle büyük ölçekli uygulamalarda sınırlanmaktadır [11], [12].

2.4. Teknik Zorluklar ve Ar-Ge Alanları

SNG üretimindeki başlıca teknik sorunlar; metanasyon reaktörlerinde ısı yönetimi ve Ni katalizör zehirlenmesi, sentez gazı bileşiminin değişkenliği, biyometanasyonda kütle transfer sınırlamaları ve doğal gaz şebekesi kalite gerekliliklerine uyum zorunluluğudur [7], [9]–[12]. Güncel çözümler ise izotermal mikro/plate-type reaktörler, kükürt-halojen toleranslı katalizör

destekleri, mikro-baloncuk veya membran biyoreaktörleri ve gerçek zamanlı gaz kalite kontrol sistemlerine odaklanmaktadır [11], [12].

2.5. Sonuç ve Gelecek Perspektifi

Sentetik doğal gaz (SNG), karbonsuzlaşma hedefleriyle uyumlu, şebeke esnekliğini artıran ve mevcut altyapı ile yüksek düzeyde uyumlu bir enerji vektörü olarak geleceğin enerji sistemlerinde giderek daha merkezi bir konum kazanmaktadır [9], [10]. Orta vadede Power-to-Gas tabanlı e-SNG projeleri, yenilenebilir enerji payı yüksek elektrik sistemlerinde LCA temelli çevresel üstünlüklerini açık biçimde ortaya koyacaktır [10], [12].

Türkiye özelinde; biyokütle lojistiği, endüstriyel CO₂ kaynaklarının coğrafi dağılımı, ve bölgesel elektrik karması dikkate alınarak yürütülecek senaryo bazlı TEA/LCA çalışmaları, hem ulusal politika hem de yatırım kararları için değerli nicel veri sağlayacaktır [12].

3. ELEKTROKİMYASAL ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ

Elektrokimyasal enerji depolama sistemleri; bataryalar, süperkapasitörler ve yakıt hücrelerinden oluşur ve kimyasal enerjiyi elektrot reaksiyonlarıyla elektrik enerjisine dönüştürür [2], [5].

Bataryalar kapalı sistemler olup iyon hareketiyle enerji depolar. Başlıca türleri lityum-iyon, sodyum-iyon, kurşun-asit, nikel-metal hidrit ve redoks akışkan bataryalardır [2], [5], [9]. Lityum-iyon bataryalar yüksek enerji yoğunluğu ve uzun çevrim ömrü sayesinde taşınabilir cihazlarda ve elektrikli araçlarda yaygınken; kurşun-asit bataryalar düşük maliyetleri nedeniyle kullanılır fakat düşük özgül enerji ve sınırlı ömürleri modern şebeke uygulamalarında dezavantaj oluşturur [2], [5].

Büyük ölçekli depolama için redoks akışkan bataryalar (ör. VRFB) elektrolit hacmine bağlı ölçeklenebilirlik sunar [5]. Süperkapasitörler düşük enerji yoğunluklarına rağmen yüksek güç yoğunluğu ve çok uzun çevrim ömürleriyle ani yük değişimlerinde dengeleme amaçlı kullanılır [2], [5].

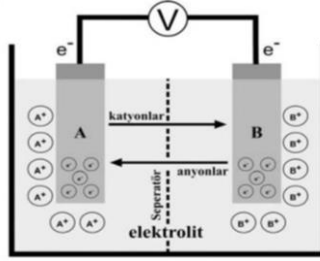
Yakıt hücreleri ise kimyasal enerjiyi doğrudan elektrığe çeviren açık sistemlerdir. PEMFC, SOFC ve MCFC gibi türler hidrojen veya sentetik metan kullanarak temiz enerji üretir ve yenilenebilir enerji entegrasyonu ile frekans regülasyonu gibi uygulamalarda önemli rol oynar [5], [12].

3.1. Batarya (Pil)

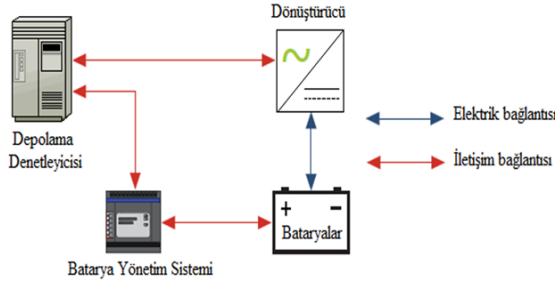
Bataryalar, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren ve gerektiğinde bu enerjiyi yeniden depolayabilen elektrokimyasal sistemlerdir. Temel olarak iki elektrot (anot ve katot) ve iyon iletimini sağlayan bir elektrolitten oluşurlar.

Deşarj sürecinde elektrotlar arasında elektron akışı gerçekleşirken, iyonlar elektrolit içerisinde zıt yönde hareket eder; bu sayede devre üzerinden elektrik akımı elde edilir. Ters yönde akım uygulandığında ise iyonlar başlangıç konumlarına döner ve sistem yeniden enerji depolayabilir [2], [5].

Bataryaların temel yapısı elektrot, elektrolit ve separatör bileşenlerinden oluşur. Elektrotlar enerji dönüşüm reaksiyonlarının gerçekleştiği yüzeylerdir; elektrolit iyon taşınımını sağlar, separatör ise elektrotlar arasında doğrudan temasın önüne geçer [2].



Şekil 3. Bataryaların temel yapısı [2]



Şekil 4. Batarya enerji depolama sistemi [2]

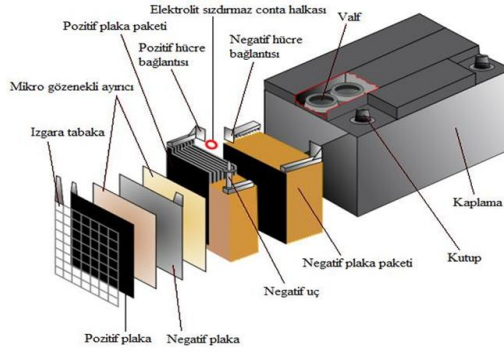
Batarya depolama teknolojileri, büyük ölçekli enerji santrallerinden mikro şebekelere kadar geniş bir alanda kullanılmakta olup enerji arz–talep dengesi, yük dengeleme, pik talep azaltımı ve frekans kararlılığı gibi kritik işlevler üstlenir [2], [5].

Depolama kapasitesi; elektrot malzemesinin özgül kapasitesine, elektrolitin iyon iletkenliğine ve hücre tasarımına bağlıdır. Bu parametreler alternatif enerji altyapılarının boyutlandırılmasında temel belirleyicidir [5]. Bataryaların ortalama işletme ömrü 20 °C’de genellikle 5–10 yıl olup çevrim sayısı ve şarj–deşarj derinliği gibi kullanım koşullarına bağlı olarak değişir [2].

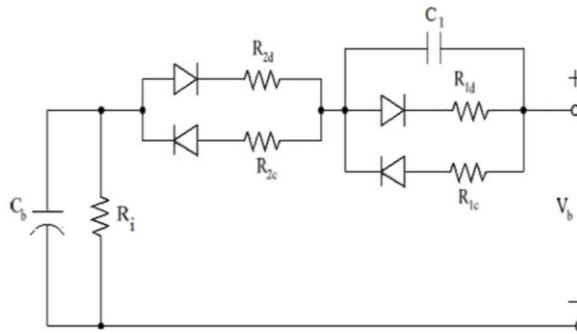
3.1.1. Kurşun Asit Pil

Kurşun-asit bataryalar, Pb/PbO₂ elektrotları ve H₂SO₄ elektrolitiyle çalışan, en eski ve en yaygın depolama sistemleridir [2], [5]. Deşarjda Pb ve PbO₂ sülfat iyonlarıyla birleşerek PbSO₄ oluşturur; şarjda bu reaksiyon tersine döner ve enerji depolanır. Yapı olarak pozitif-negatif plakalar, separatör ve valf kontrollü muhafazadan oluşur; hücreler seri/paralel bağlanarak istenen kapasiteye ulaşılır [2].

Bu bataryalar 30–50 Wh/kg enerji yoğunluğu, yüksek deşarj akımı, düşük maliyet ve geri dönüştürülebilirlik avantajları sunar. Buna karşılık yüksek ağırlık, sınırlı çevrim ömrü (≈ 500 –1000 çevrim) ve derin deşarja duyarlılık önemli sınırlamalardır. Performansı artırmak için jel elektrolitler ve plaka geliştirmeleri üzerine çalışmalar sürmektedir. Ortalama maliyet ise yaklaşık 549 \$/kWh düzeyindedir [2].



Şekil 5. Kurşun-asit bataryanın genel yapısı



Şekil 6. Batarya için eşdeğer devre modeli [2]

Kurşun-asit bataryanın dinamik davranışı RC eşdeğer devre modeli ile temsil edilir. Bu model, bataryanın iç direncini, şarj ve deşarj sırasındaki kayıpları ve gerilim gecikmelerini yansıtır.

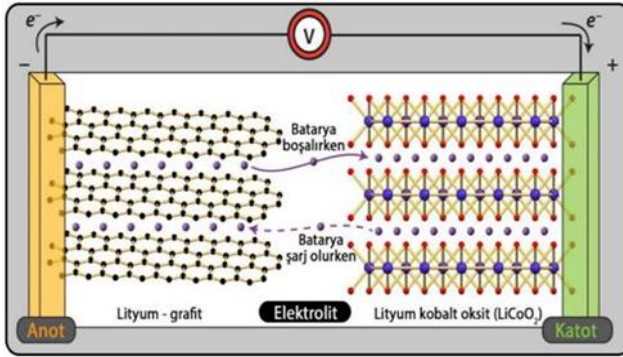
Batarya parametreleri aşağıda verilmiştir:

- (V_b) – Batarya gerilimi (V)
- (C_b) – Batarya kapasitansı (μF)
- (R_i) – Kendi kendine deşarj veya izolasyon direnci (Ω)
- (R_{2c}) – Şarj için iç direnç (Ω)
- (R_{2d}) – Deşarj için iç direnç (Ω)
- (R_{1c}) – Şarj için aşırı gerilim direnci (Ω)
- (R_{1d}) – Deşarj için aşırı gerilim direnci (Ω)
- (C_1) – Aşırı gerilim kapasitansı (μF)

Bu parametreler, bataryanın termal davranışının, iç kayıplarının ve gerilim dinamiklerinin modellenmesinde kullanılır. Model, enerji depolama sistemlerinin simülasyon ve kontrol algoritmalarının geliştirilmesinde yaygın olarak tercih edilmektedir [2], [5].

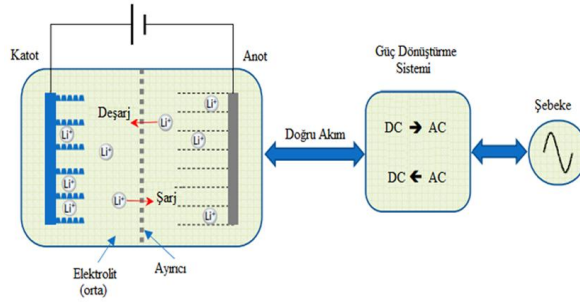
3.1.2. Lityum İyon Pil

Lityum-iyon bataryalar, yüksek enerji yoğunluğu, uzun çevrim ömrü ve yüksek verimleri sayesinde taşınabilir elektroniklerden elektrikli araçlara ve şebeke ölçekli depolamaya kadar geniş bir kullanım alanına sahip gelişmiş depolama sistemleridir [2], [5]. Bu bataryalar; grafit anot, LiCoO_2 veya LiFePO_4 gibi metal oksit katotlar ve lityum iyonlarının geçişini sağlayan elektrolitten oluşur. Şarj sırasında iyonlar katottan anoda geçerek grafit tabakalarına interkale olur; deşarjda ise ters yönde hareket ederek enerji üretir [2], [9].



Şekil 7. Lityum-iyon bataryalarda iyon hareketi ve şarj-deşarj prensibi [2].

Lityum-iyon sistemler 150–250 Wh/kg enerji yoğunluğu, 2000–5000 çevrim ömrü ve %95–98 şarj verimi sunar [5], [9]. Düşük sıcaklıklarda performans kaybı ve termal kaçak riski nedeniyle gelişmiş Batarya Yönetim Sistemleri (BMS) ile birlikte çalıştırılır [12].



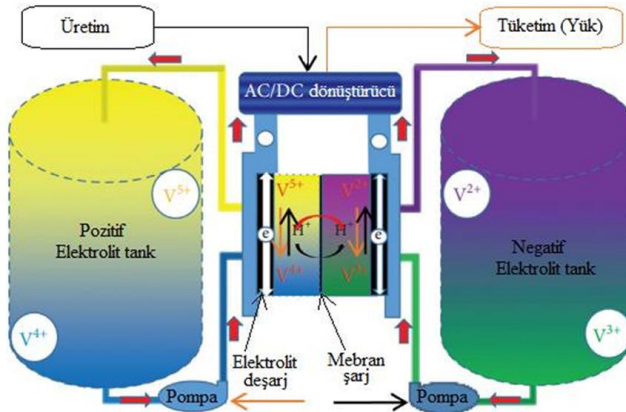
Şekil 8. Sabit lityum-iyon batarya ile enerji depolama sisteminin şematik yapısı [2].

Şekil 8’de görüldüğü üzere sabit depolama uygulamalarında batarya DC güç üretir; bu güç dönüştürme birimiyle AC’ye çevrilerek şebekeye aktarılır. Bu yapı, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen enerjinin geçici depolanması, frekans kararlılığı ve pik yük dengelemesi için yaygın olarak kullanılmaktadır [2], [5].

3.1.3. Vanadyum Redoks Akış Pili

Vanadyum redoks akış pilleri (VRFB), uzun ömürlü, güvenli ve büyük ölçekli enerji depolama uygulamaları için geliştirilen akış tipi bataryalardır. Sistemde elektrolitler iki ayrı tankta depolanır ve pozitif (V^{5+}/V^{4+}) ile negatif (V^{3+}/V^{2+}) iyon çiftlerinin redoks reaksiyonlarıyla enerji dönüşümü sağlanır [2], [5].

VRFB’ler bir yığın (stack), iki elektrolit tankı ve pompalarla sirküle edilen elektrolit döngüsünden oluşur. Proton iletken membran (ör. Nafion) boyunca iyon dengesi korunurken, elektron akışı harici devre üzerinden gerçekleşir [2].



Şekil 9. Vanadyum redoks akış pilinin şarj ve deşarj prensibi şeması [2]

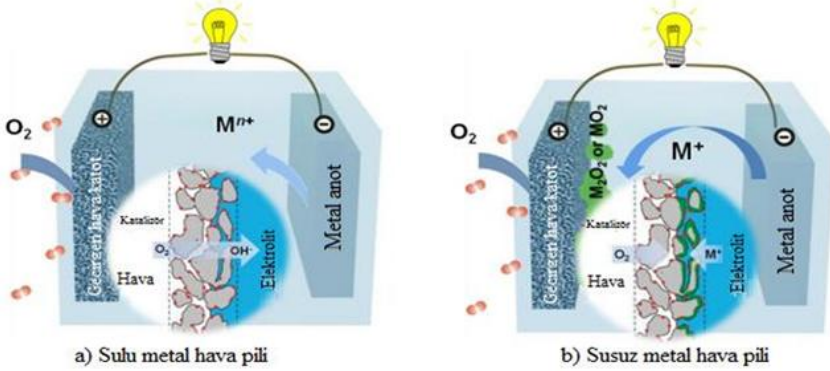
Şekil 9’da gösterildiği gibi VRFB’lerde şarj sırasında $V^{4+} \rightarrow V^{5+}$ ve $V^{3+} \rightarrow V^{2+}$ dönüşümleri gerçekleşir; deşarjda bu reaksiyonlar tersine dönerek elektrik üretir [2]. Reaksiyonların tamamen çözeltide gerçekleşmesi, elektrotlarda katı faz

değişimi olmamasını sağlar ve bu özellik VRFB'lere 10.000 çevrimin üzerindeki uzun ömür ile yüksek kararlılık kazandırır [5].

VRFB sistemleri yanmaz, patlamaz ve sıfır DC gerilime kadar güvenle boşaltılabilir yapılarıyla en güvenli depolama teknolojileri arasındadır [2]. Enerji yoğunlukları düşük (20–50 Wh/kg) olmakla birlikte; yüksek güvenlik, modüler ölçeklenebilirlik ve uzun ömür avantajları nedeniyle yenilenebilir enerji entegrasyonu, şebeke dengeleme ve mikroşebeke uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [2], [5]. Modüler yapıları sayesinde VRFB üniteleri 6 veya 12 metrelik konteynerlerde sahaya kolayca kurulabilir.

3.1.4. Metal Hava Pili

Metal-hava piller, yüksek enerji yoğunluğu, düşük maliyet ve çevre dostu özellikleriyle son yıllarda enerji depolama teknolojileri arasında dikkat çekmektedir. Bu piller, metal anot (örneğin Zn, Al, Mg, Li, Fe) ve hava katodu (oksijen indirgeme elektrodu) arasında gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlarla çalışır. Reaksiyon sırasında metal oksitlenirken, havadaki oksijen indirgenir ve böylece elektrik enerjisi üretilir [2].



Şekil 10. Metal-hava pillerin şematik konfigürasyonu ve çalışma prensibi [2]

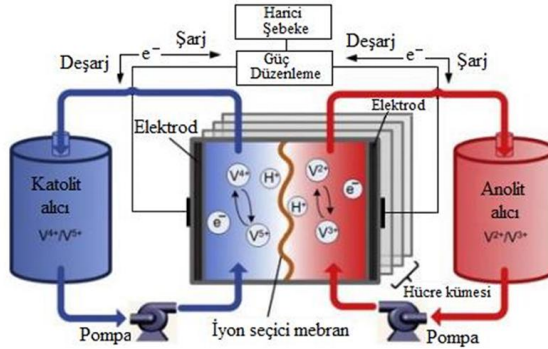
Sulu elektrolitli metal-hava pillerde iyon taşınımı KOH ortamında OH⁻ iyonlarıyla gerçekleşirken, katotta oksijen indirgenerek metal hidroksit/oksit ürünleri oluşur. Katı elektrolitli susuz sistemlerde ise lityum veya magnezyum iyonları taşınımı sağlar; bu yapı daha yüksek enerji yoğunluğu sunmakla birlikte elektrot stabilitesi açısından hâlen geliştirme aşamasındadır [2], [5].

Metal-hava piller birincil, ikincil ve mekanik olarak yeniden şarj edilebilir türlere ayrılır. Birincil sistemler (Zn–hava) tek kullanımlık olup küçük tıbbi cihazlarda yaygınken, ters reaksiyonun mümkün olduğu ikincil sistemler (Li–hava, Al–hava) elektrikli araçlar ve büyük ölçekli depolama için potansiyel taşıyıcıdır [2].

Bu pillerin teorik enerji yoğunluğu 1000–3000 Wh/kg arasındadır; ancak oksijen elektrot kinetiği, katot kararlılığı, elektrolit buharlaşması ve karbonatlaşma gibi sorunlar ticari uygulamayı sınırlar. Özellikle Li–hava sistemleri nem ve CO₂’ye karşı duyarlılık nedeniyle çevresel kararlılık problemi yaşamaktadır [5].

3.1.5. Akış Piller

Akış pilleri, kimyasal reaksiyonlara dayanan ve elektrolitlerin sürekli sirkülasyonu ile çalışan yeniden şarj edilebilir enerji depolama sistemleridir. Enerji, ayrı tanklarda depolanan iki elektrolitin iyon alışverişiyle depolanır ve serbest bırakılır [2].



Şekil 11. Bir akış pilinin şematik diyagramı [2]

Şekil 11’de görüldüğü üzere akış pili; anolit ve katolit tankları, iyon-seçici membran, elektrotlar ve pompalardan oluşur. Elektrolitler reaksiyon hücresine taşınarak redoks tepkimelerine girer; elektron akışı dış devrede, iyon akışı ise membran üzerinden sağlanır [2], [5].

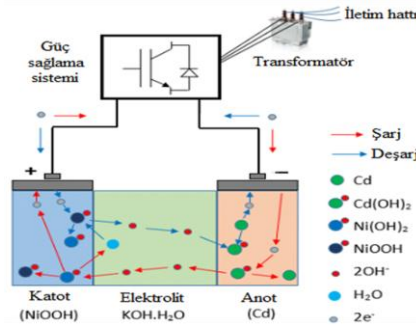
Modüler yapıları sayesinde bu piller 1 kWh–10 MWh aralığında ölçeklenebilir ve sabit depolama, UPS, bağımsız güç sistemleri ve şarj altyapısı gibi pek çok uygulamada tercih edilir. Enerji kapasitesi elektrolit hacmine, güç kapasitesi ise yığın boyutuna bağlı olduğundan her iki parametre bağımsız olarak tasarlanabilir. Uzun çevrim ömrü (≈ 10.000 çevrim), düşük kendiliğinden deşarj ve yüksek güvenlik akış pillerinin temel avantajlarıdır [5].

En yaygın akış pili türleri VRFB, Zn–Br₂ ve Fe–Cr sistemleridir. VRFB’ler aynı elementin farklı yükseltgenme basamaklarını kullandıkları için elektrolit karışımı ve çapraz geçiş sorunlarını azaltır [2], [5]. Buna rağmen düşük enerji yoğunluğu (20–50 Wh/kg), pompa–borulama karmaşıklığı ve yüksek başlangıç maliyeti önemli dezavantajlardır. Bu nedenle güncel çalışmalar; membran iyileştirme, elektrot yüzey tasarımı ve elektrolit optimizasyonuna odaklanmaktadır [5].

Lityum metal pillerde en kritik sorun, şarj sırasında anot yüzeyinde oluşan dendritlerdir. Bu yapılar kısa devre riskini artırdığı için güncel çalışmalar; katı hâl elektrolitler, jel elektrolitler ve anot yüzey modifikasyonlarına odaklanmaktadır [5]. Son araştırmalarda iyonik sıvı elektrolitlerin (ILE) düşük buhar basıncı ve geniş elektrokimyasal kararlılığı sayesinde dendrit oluşumunu azalttığı ve kapasite korunumunu artırdığı gösterilmiştir. ILE kullanılan hücrelerde kapasite koruma %88, geleneksel LP30 elektrolitte ise yalnızca %36.9 düzeyindedir [2].

3.1.7. Nikel Kadmiyum Pil

Nikel–kadmiyum (NiCd) piller, yüksek güvenilirlikleri, uzun çevrim ömürleri ve geniş sıcaklık aralığında çalışabilme özellikleri nedeniyle uçak sistemleri, telekom altyapıları ve yenilenebilir enerji depolama gibi kritik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [2]. Yapı olarak nikel hidroksit katot, kadmiyum anot ve KOH bazlı elektrolitten oluşur; hücreler ise iyon geçişini sağlayan ayırıcılar ve gaz kontrol sistemiyle desteklenmiş nikel kaplamalı çelik bir gövdede birleştirilir [2], [5].



Şekil 14. Nikel kadmiyum pilin enerji üretim şeması [2].

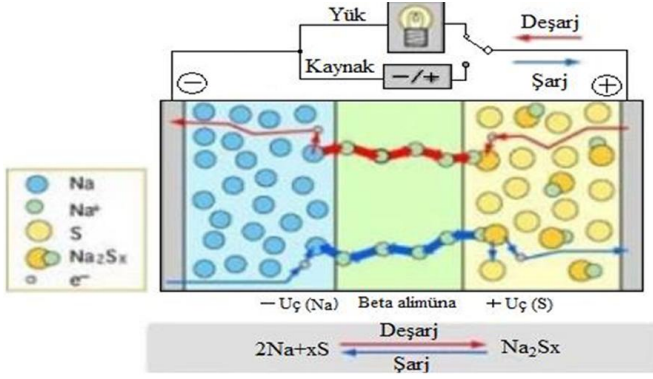
NiCd pillerde enerji dönüşümü, şarj ve deşarj sırasında gerçekleşen redoks reaksiyonlarına dayanır. Deşarj esnasında anotta $Cd + 2OH^- \rightarrow Cd(OH)_2 + 2e^-$, katotta ise $2NiOOH + 2H_2O + 2e^- \rightarrow 2Ni(OH)_2 + 2OH^-$ reaksiyonları meydana gelir. Şarj sürecinde bu reaksiyonlar tersine dönerek pilin yeniden enerji depolaması sağlanır [2].

NiCd piller; 40–60 Wh/kg enerji yoğunluğu, 150–300 W/kg güç yoğunluğu, %70–85 verim ve 2000 çevrime kadar ömür gibi avantajlara sahiptir. Geniş sıcaklık aralığında (–20 °C ila +60 °C) kararlı çalışmaları da kritik bir üstünlüktür. Ancak hafıza etkisi, kendi kendine deşarj (%2–5) ve kadmiyumun toksikliği önemli dezavantajlardır. Bu nedenle birçok modern uygulamada NiMH ve lityum-iyon pillerin tercih edilmeye başlandığı görülmektedir [5].

3.1.8. Sodyum Sülfür Pil

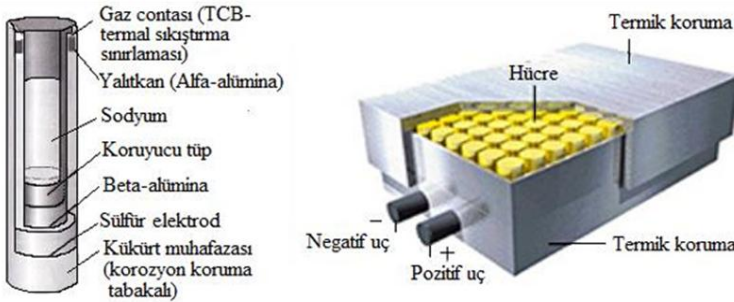
Sodyum–sülfür (Na–S) piller, yüksek enerji yoğunluğu, uzun çevrim ömrü ve yüksek çalışma sıcaklığına sahip termal batarya sistemleridir. 1960’lardan beri sabit enerji depolama ve yenilenebilir enerji entegrasyonu için kullanılmaktadır [2], [5].

Bu pillerde reaksiyon, yüksek sıcaklıkta sıvı sodyum ile sıvı kükürt/polisülfür fazları arasında gerçekleşir. Deşarjda sodyum anotta oksitlenerek Na^+ ve elektronlara ayrılır ($2\text{Na} \rightarrow 2\text{Na}^+ + 2e^-$); Na^+ iyonları β -alümina elektrolitten katoda geçerek kükürt ile birleşip polisülfür bileşikleri oluşturur (Na_2S_x). Şarjda reaksiyon tersine dönerek sodyum yeniden anotta birikir [2], [5].



Şekil 15. Sodyum sülfür iç yapısı [2]

Şekil 15’de Na–S pilin temel çalışma prensibi şematik olarak gösterilmektedir. Deşarj sırasında sodyum iyonları anot bölgesinden β -alümina elektrolit üzerinden katoda göç eder ve kükürt/polisülfür fazı ile reaksiyona girerek Na_2S_x bileşiklerini oluşturur. Bu sırada açığa çıkan elektronlar dış devre üzerinden ilerleyerek elektrik enerjisi üretir; şarj sürecinde ise iyon ve elektron akışı ters yönde gerçekleşir [2].



Şekil 16. Sodyum sülfür pil yapısı [2]

Şekil 16’da sodyum–sülfür (Na–S) pilin yapısal tasarımı gösterilmektedir. Hücreler genellikle silindirik formda olup gaz contası, alfa-alümina yalıtkan katman, çelik kılıf ve termal koruma elemanlarından oluşur. 300–350 °C çalışma aralığı nedeniyle ısı kayıplarını azaltmak ve güvenliği sağlamak amacıyla iyi yalıtılmış muhafazalar kullanılmaktadır [2], [5].

Na–S piller; yüksek enerji yoğunluğu (150–240 Wh/kg), uzun çevrim ömrü (>2500 çevrim), yüksek verim (%85–90), düşük bakım ihtiyacı ve geri dönüştürülebilir yapılarıyla uzun süreli enerji depolama, yenilenebilir enerji dengeleme, mikroşebekeler ve yük kaydırma uygulamalarında öne çıkmaktadır [2], [5].

Bununla birlikte yaklaşık 350 °C’lik yüksek çalışma sıcaklığı, gelişmiş izolasyon gereksinimi, termal kaçak riski ve yüksek başlangıç maliyetleri önemli sınırlayıcı etkenlerdir. Bu nedenle güncel çalışmalar, daha düşük sıcaklıklarda çalışabilen katı hâl Na–S teknolojilerine ve sodyum-iyon pillere yönelmektedir [5]. Na–S piller uzun süreli depolamada avantaj sağlarken, lityum-iyon piller kısa süreli yüksek güç uygulamalarında tercih edilmekte ve hibrit sistemlerde birbirini tamamlayıcı şekilde değerlendirilmektedir [2].

3.2. Yakıt Hücresi

Yakıt hücreleri, kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren elektrokimyasal sistemlerdir. Anot, katot ve elektrolitten oluşan bu yapıda yakıt (H_2 , metanol, etanol veya doğal gaz türevleri) anoda, oksitleyici ise (O_2 veya hava) katoda sürekli beslendiğinde sistem kesintisiz elektrik üretir. Bu yönüyle bataryalardan farklı olarak sürekli enerji dönüşümü sağlar [2], [5].

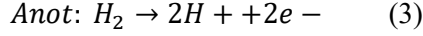
Temel çalışmada yakıt anotta okside olur; açığa çıkan protonlar elektrolitten geçerken elektronlar dış devre üzerinden katoda yönelir. Katotta elektronlar oksitleyici ile birleşerek su veya CO_2 gibi ürünleri oluşturur. Doğrudan yanma gerçekleşmediği için yanma kayıpları ve emisyonlar oldukça düşüktür [2].

Yakıt hücrelerinin performansı; elektrolit türü, yakıt cinsi, çalışma sıcaklığı ve iyon iletim mekanizmasına bağlı olarak değişir [5].

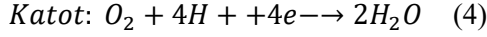
3.2.1. Proton Değişimli Membran Yakıt Hücresi (PEMFC)

Proton değişimli membranlı yakıt hücreleri (PEMFC), düşük sıcaklıkta (yaklaşık 60–80 °C) çalışan, yüksek güç yoğunluğu ve hızlı başlatılma özelliğiyle öne çıkan sistemlerdir. Bu hücreler, hidrojen yakıtını doğrudan elektrığe dönüştüren elektrokimyasal enerji dönüştürücüleridir.

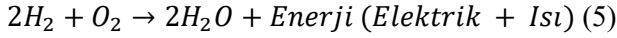
Sistem, platinyum kaplı anot ve katot elektrotları, proton iletkin polimer elektrolit membranı (örneğin Nafion) ve akış kanallarından oluşur. Hidrojen gazı anoda verildiğinde aşağıdaki oksidasyon reaksiyonu gerçekleşir:



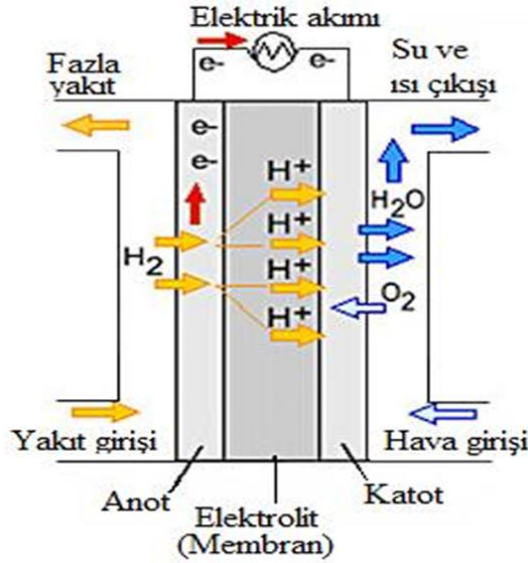
Açığa çıkan protonlar (H^+) polimer elektrolit membranından geçerken, elektronlar (e^-) dış devre üzerinden yükü besler ve elektrik akımı oluşturur. Katotta ise oksijenin indirgenmesiyle su ve ısı üretilir:



Bu iki reaksiyonun birleşimi sonucu sistemin net reaksiyonu elde edilir:



PEMFC'ler, sessiz çalışma, düşük emisyon (yalnızca su buharı) ve yüksek enerji verimliliği (%30–35) gibi avantajlarıyla özellikle otomotiv, uzay ve askeri uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [2], [5]



Şekil 17. PEM yakıt hücresi şematik diyagramı [2]

Şekil 17’de bir PEM yakıt hücresinin şematik yapısı verilmiştir. Yakıt olarak hidrojen, anottan girerek proton ve elektrona ayrılır. Protonlar elektrolitten geçerken, elektronlar dış devrede yükü besler. Katotta oksijenle birleşen proton ve elektronlar sonucunda su ve ısı açığa çıkar.

PEM sistemlerinin dezavantajları arasında, platin katalizörlerin yüksek maliyeti, yakıt saflığı gerekliliği ve membran su yönetiminin zorluğu bulunmaktadır. Bu nedenle güncel araştırmalar, platin-grup metallerin

azaltılması, iyon iletken membranların termal kararlılığının artırılması ve hidrojen üretim maliyetlerinin düşürülmesi üzerine yoğunlaşmıştır [2].

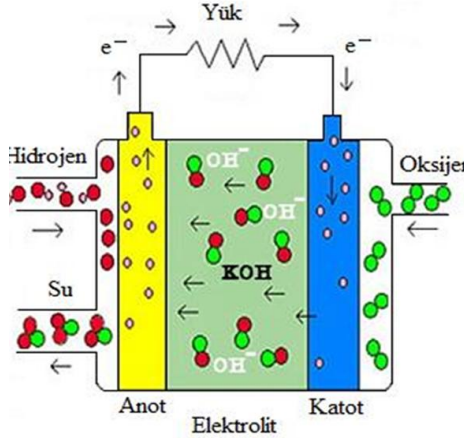
3.2.2. Alkali Yakıt Hücresi

Alkali yakıt hücreleri (AFC), potasyum hidroksit (KOH) içeren sıvı elektrolit kullanan ve yüksek güç yoğunluğu ile %60–70'e ulaşan verimleri sayesinde özellikle erken uzay uygulamalarında tercih edilen bir yakıt hücresi türüdür [2].

AFC'lerde hidrojen anotta oksitlenir; oluşan elektronlar dış devreye, hidroksil iyonları (OH^-) ise elektrolit üzerinden katoda taşınır. Katotta oksijen indirgenerek su oluşur ve hücre 60–250 °C gibi düşük sıcaklıklarda verimli şekilde çalışır [2].

Düşük sıcaklıkta hızlı devreye girebilmesi, yüksek güç yoğunluğu ve platin dışı katalizörlerle çalışabilme potansiyeli AFC'lerin önemli avantajlarıdır [2]. Ancak anotta oluşan suyun elektroliti seyreltmesi OH^- iletkenliğini düşürerek performans kaybına yol açar; bu nedenle elektrolit konsantrasyonunun sabit tutulması kritik öneme sahiptir [2].

Bu sorun; elektrolitin sirkülasyonu, gaz akış hızlarının optimizasyonu, seperatör/yoğusturucu ekipmanlarla suyun uzaklaştırılması ve membran geçirgenliğinin uygun tasarlanmasıyla yönetilebilir. Ek olarak sıcaklık kontrolü, elektrolit viskozitesi ve buharlaşma dengesini stabilize ederek hücre verimine katkı sağlar [2].



Şekil 18. Alkali yakıt hücresinin şematik gösterimi [2].

3.2.3. Fosforik Asit Yakıt Hücresi (PAFC)

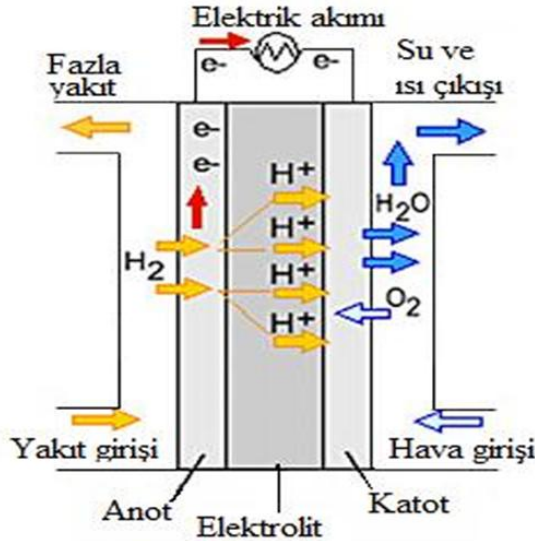
Fosforik Asit Yakıt Hücreleri (PAFC), 150–220 °C sıcaklık aralığında çalışan ve elektrolit olarak yüksek saflıkta fosforik asit kullanan orta sıcaklıklı sistemlerdir. Platinyum katalizörlü elektrotlarda hidrojen anotta proton ve

elektronlara ayrılır; protonlar elektrolitten katoda geçerken elektronlar dış devrede akarak elektrik üretir. Katotta protonların oksijenle birleşmesi sonucu su oluşur ($H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$) [2].

PAFC'lerin önemli bir avantajı, doğalgaz veya LPG gibi hidrokarbonlardan reforme edilen hidrojeni kullanabilmeleridir. Yakıt saflığı toleransları PEMFC'lere göre daha yüksek olsa da CO_2 ve özellikle CO içeriği yüksek akımlar katalizör zehirlenmesine neden olabilir [2].

Fosforik asidin yüksek proton iletkenliği ve kimyasal dayanımı uzun süreli kararlılık sağlar; ancak asidik ortam korozyon riskini artırdığı için karbon bazlı/seramik destekli elektrotlar ve asit dayanımı yüksek sızdırmazlık malzemeleri tercih edilir. Bipolar plakalar, hem akım toplama hem de yapısal bütünlük için kritik öneme sahiptir [5]. PAFC'lerin elektriksel verimi %35–40 civarındadır; ancak atık ısının kojenerasyon uygulamalarında kullanılmasıyla toplam verim %80'e kadar ulaşabilir [2]. Bu nedenle PAFC'ler özellikle bina tipi uygulamalar ve CHP sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [5].

Teknolojinin başlıca avantajları kimyasal kararlılık, düşük gürültü, uzun ömür ve olgun bir endüstriyel altyapıdır. Buna karşın yüksek platin maliyeti, düşük güç yoğunluğu, CO hassasiyeti ve elektrolit ağırlığı dezavantaj oluşturmaktadır. Güncel araştırmalar platin kullanımının azaltılması, alternatif katalizörler, elektrolit stabilitesinin artırılması ve reformer entegrasyonunun geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmaktadır [2], [5].



Şekil 19. Fosforik asit yakıt hücresinin yapısı [2]

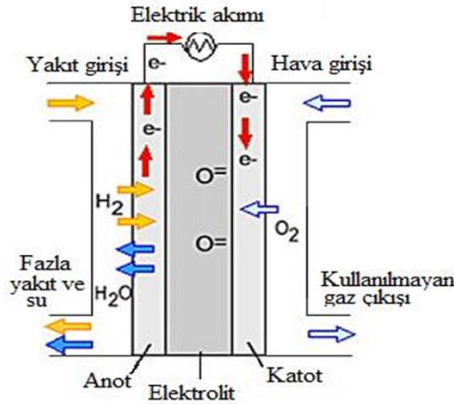
3.2.4. Katı Oksitli Yakıt Hücresi (SOFC)

Katı Oksitli Yakıt Hücreleri (SOFC), 800–1000 °C gibi yüksek sıcaklıklarda çalışan ve elektrolit olarak genellikle itriya ile stabilize edilmiş zirkonya (YSZ) kullanılan gelişmiş sistemlerdir. Bu hücrelerde oksijen iyonları (O^{2-}) katı seramik elektrolit üzerinden taşınır; anotta hidrojen veya metan oksitlenirken elektronlar dış devrede akım oluşturur, katotta ise oksijen elektron alarak oksit iyonuna dönüşür. Böylece hem elektrik hem de yüksek derecede ısı üretilir [2].

SOFC'lerin başlıca avantajı, yüksek sıcaklık sayesinde hidrokarbon yakıtların reforme edilmeksizin doğrudan kullanılabilmesidir. Doğalgaz, biyogaz ve H_2 karışımları katalizör gereksinimi olmadan beslenebilir; ayrıca yüksek sıcaklık reaksiyon kinetiğini hızlandırarak platin gibi pahalı katalizörlere olan ihtiyacı ortadan kaldırır [2].

YSZ, iyon iletkenliği, mekanik dayanım ve kimyasal kararlılık özellikleriyle en yaygın elektrolit malzemesidir. GDC ve SDC gibi serium oksit bazlı alternatifler ise 600–800 °C'de çalışan düşük sıcaklıklı SOFC (IT-SOFC) tasarımlarında daha yüksek verim-ömrü dengesi sağlayabilmektedir [5]. SOFC sistemleri, yüksek sıcaklıkta üretilen ısıyı türbinlerle birleştirilmesiyle kombine çevrimli üretime olanak tanır. Bu hibrit yapı elektriksel verimi %50–55'e, toplam enerji verimini ise %80'in üzerine çıkararak SOFC'leri CHP/CCHP uygulamaları için uygun hâle getirir [2].

Bununla birlikte yüksek çalışma sıcaklığı, malzeme uyumsuzluğu, termal gerilmeler ve uzun başlatma süreleri gibi tasarım zorlukları yaratır. Bu nedenle güncel araştırmalar, 600–800 °C aralığında çalışan IT-SOFC mimarileri, ince film elektrolitler, nanoyapılı elektrotlar ve termomekanik gerilmeyi azaltan kompozit yapılar üzerine yoğunlaşmaktadır [5].



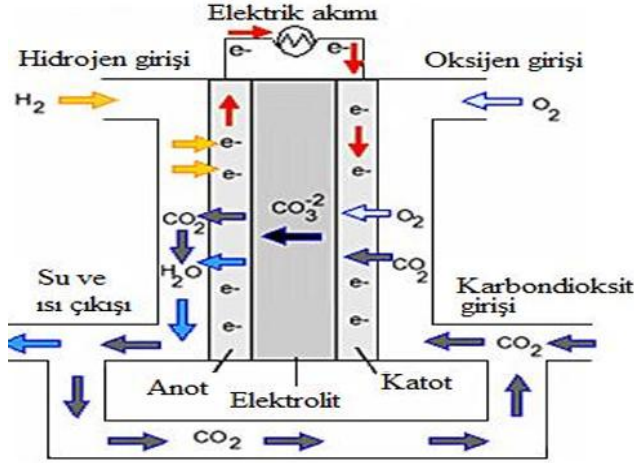
Şekil 20. Katı oksit yakıt hücresi şematik gösterimi [2]

3.2.5. Erimiş Karbonatlı Yakıt Hücresi (MFCF)

Erimiş Karbonatlı Yakıt Hücreleri (MCFC), 600–650 °C aralığında çalışan yüksek sıcaklıklı sistemlerdir. Elektrolit olarak lityum, sodyum ve potasyum karbonatlarının eriyik karışımı kullanılır. Katotta oksijen ve CO₂'nin oluşturduğu karbonat iyonları (CO₃²⁻) elektrolit üzerinden anoda taşınır ve burada hidrojen, CO veya metanla reaksiyona girerek elektrik üretimi sağlanır [2].

MCFC'lerin en önemli avantajı, CO ve hidrokarbon içeren yakıtlarla doğrudan çalışabilmesidir. Bu esneklik, biyogaz, sentetik gaz ve doğalgaz reform ürünlerinin kullanılmasına imkân tanır. Ayrıca nikel bazlı katalizörlerin tercih edilmesi platin ihtiyacını ortadan kaldırarak sistemi büyük ölçekli enerji santralleri ve kojenerasyon uygulamaları için maliyet açısından uygun hâle getirir [2].

Yüksek sıcaklık kaynaklı atık ısı türbinlerle entegre edilerek değerlendirilebilir ve bu sayede elektriksel verim %45–55'e, toplam verim ise %80'in üzerine çıkabilir. Bu özellik MCFC'leri CHP sistemlerinde yaygın bir seçenek hâline getirmektedir [2]. Buna karşın yüksek sıcaklık, termal gerilmeler, elektrot korozyonu ve karbonat buharlaşması gibi sorunlara yol açar. Bu nedenle paslanmaz çelik destek yapılar ve koruyucu kaplamalarla sistem ömrünün uzatılması hedeflenir [2].



Şekil 21. Erimiş karbonatlı yakıt hücresi şematik gösterimi [2].

4. SONUÇ

Kimyasal ve elektrokimyasal enerji dönüşüm teknolojileri, sürdürülebilir enerji altyapılarının oluşturulmasında birbirini tamamlayan iki temel yaklaşımı temsil etmektedir. Kimyasal enerji depolama; atomik bağlarda depolanan potansiyel enerjiyi uzun vadeli, yüksek kapasiteli bir formda saklama imkânı

sunarken [1], elektrokimyasal sistemler hızlı tepki süreleri ve yüksek dönüşüm verimlilikleri sayesinde kısa süreli güç gereksinimlerinde kritik rol üstlenmektedir [2], [5]. Bu çalışmada hidrojen, SNG, elektrolizörler, biyometanasyon ve metanasyon süreçleri ile bataryalar ve yakıt hücreleri gibi geniş bir teknoloji yelpazesinin birlikte ele alınması, enerji dönüşüm zincirinin çok katmanlı yapısını daha açık biçimde ortaya koymuştur.

Hidrojenin enerji taşıyıcısı olarak değerlendirilmesi, yüksek özgül enerji yoğunluğu ve emisyonuz kullanım özellikleri nedeniyle geleceğin enerji sistemleri için stratejik önem taşımaktadır [1], [2]. Hidrojenin elektroliz, termoliz ve biyokimyasal yöntemlerle üretimi üzerine yapılan değerlendirmeler, özellikle yenilenebilir elektriğe dayalı yeşil hidrojenin enerji sistemlerinin karbonsuzlaştırılmasında merkezi rol oynayacağını göstermektedir [3], [4]. Hidrojenin gaz, sıvı ve kimyasal taşıyıcı formlarında depolanması üzerine yapılan karşılaştırmalar ise LOHC, metal hidrür ve amonyak gibi kimyasal yöntemlerin güvenlik ve taşınabilirlik açısından öne çıktığını doğrulamaktadır [3], [5].

SNG üretiminin hem termokimyasal hem de elektrokimyasal yollarla incelenmesi sonucunda, karbon döngüsünün kapatılmasını mümkün kılan bu yaklaşımın uzun dönemli enerji depolama ve şebeke dengeleme açısından önemli avantajlar sunduğu anlaşılmaktadır [6], [7], [12]. Sabatier reaksiyonunun ısı yönetim gereksinimi, reaktör tasarımlarında ısı geri kazanım çözümlerinin önemini vurgulamaktadır [8], [11]. Biyolojik metanasyon süreçlerinin düşük sıcaklıkta çalışması ve mikroorganizma temelli katalitik mekanizmaları ise PtG sistemlerinde esneklik sağlayan çevreci bir alternatif oluşturmuştur [11], [12].

Elektrokimyasal depolama teknolojilerinin incelenmesi, bataryaların kısa süreli enerji gereksinimlerinin karşılanmasında vazgeçilmez olduğunu ortaya koymaktadır. Lityum-iyon bataryaların yüksek enerji yoğunluğu ve uzun çevrim ömrü, günümüzde taşınabilir cihazlardan elektrikli araçlara ve sabit depolama tesislerine kadar geniş bir kullanım alanı kazandırmıştır [2], [5]. Redoks akış pilleri (VRFB) ise uzun ömür, modüler ölçeklenebilirlik ve tam deşarja dayanıklılıkları nedeniyle büyük ölçekli şebeke entegrasyonlarında önemli bir konumda yer almaktadır [5], [15]. Lityum metal bataryalar ve sodyum-sülfür sistemleri, yüksek enerji yoğunlukları ve yeni nesil malzeme geliştirmeleriyle geleceğin depolama çözümleri arasında değerlendirilmektedir [2], [17]. Metal-hava pillerin 1000–3000 Wh/kg teorik enerji yoğunluğuna sahip olması ise uzun vadede radikal bir depolama potansiyeline işaret etmektedir [5], [16].

Yakıt hücreleri, hidrojen ve türevlerini doğrudan elektriğe dönüştüren yüksek verimli sistemler olarak temiz enerji dönüşümünün temel bileşenleri arasında yer almaktadır. PEMFC’lerin düşük sıcaklıkta yüksek güç yoğunluğu sunması [2], PAFC’lerin kimyasal kararlılığı [5], MCFC ve SOFC gibi yüksek sıcaklıklı

sistemlerin %80'e varan toplam verimlerle kojenerasyon uygulamalarına olanak sağlaması [2], [12] yakıt hücrelerinin çok geniş bir kullanım alanına sahip olduğunu göstermektedir.

Bu teknolojilerin birlikte değerlendirilmesi, hiçbir teknolojinin tek başına tüm depolama ve dönüşüm ihtiyaçlarını karşılayamayacağını, ancak entegre edildiğinde güçlü bir bütün oluşturduğunu göstermektedir. Bataryalar hızlı tepki ve frekans kararlılığı sağlarken, yakıt hücreleri sürekli ve temiz enerji üretimi sunmakta; hidrojen ve SNG gibi kimyasal enerji taşıyıcıları ise mevsimsel ve büyük ölçekli depolama için vazgeçilmez bir rol üstlenmektedir [1], [10]. Böylece kimyasal ve elektrokimyasal sistemlerin hibrit yapılar hâlinde bir araya getirilmesi, sürdürülebilir enerji altyapılarının oluşturulmasında en güçlü yaklaşım olarak ortaya çıkmaktadır.

Sonuç olarak, geleceğin enerji sistemleri çok katmanlı, hibrit ve sektörel entegrasyona dayalı çözümler üzerine inşa edilecektir. Hidrojen ekonomisinin gelişimi, Power-to-Gas tabanlı e-SNG süreçlerinin endüstriyel olgunluğa erişmesi, yeni nesil batarya kimyalarının ticarileşmesi ve yüksek verimli yakıt hücrelerinin yaygınlaşması; karbon nötr bir enerji yapısına ulaşmada stratejik bileşenler olacaktır. Bu bağlamda teknolojik Ar-Ge çalışmaları, malzeme bilimi inovasyonları, yaşam döngüsü değerlendirmeleri ve ulusal enerji politikalarının bütüncül şekilde tasarlanması, sürdürülebilir enerji dönüşümünün başarısı için temel gereklilikler hâline gelmiştir.

KAYNAKÇA

- [1] Demirsoy, G. (2023). Enerji depolama teknolojilerinin anatomisi: Geleceğin enerji altyapısına giriş (Enerji Depolama Yazı Dizisi-2). Ankara: TMMOB EMO Ankara Şubesi.
- [2] Kocaman, B. (2021). Enerji depolama teknolojileri. Ankara: İksad Publishing House.
- [3] Rao, A. D., & Francuz, J. (2014). Synthetic natural gas from coal and biomass: Process technologies and environmental aspects. *Energy Conversion and Management*, 84, 104–115. doi:10.1016/j.enconman.2014.04.017
- [4] Choudhary, S. K. (2020). Catalytic conversion of biomass to synthetic natural gas: Advances and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 129, 109926. doi:10.1016/j.rser.2020.109926
- [5] Sterner, M., & Stadler, I. (2019). *Handbook of energy storage: Demand, technologies, integration*. Berlin: Springer.
- [6] Kopyscinski, J., Schildhauer, T. J., & Biollaz, S. M. (2010). Production of synthetic natural gas (SNG) from coal and dry biomass: A review. *WIREs Energy and Environment*, 2(4), 189–213. doi:10.1002/wene.189
- [7] Cormos, C. C., Agachi, P. S., & Dinca, C. (2024). Energy and environmental evaluation of integrated biomass gasification–CO₂ capture systems for SNG production. *Energy*, 302, 123783. doi:10.1016/j.energy.2024.123783
- [8] Di Bisceglie, A., Masi, A., & Falco, M. (2025). Biomass-based synthetic natural gas production: Process design and thermodynamic analysis. *Energies*, 18(3), 753. doi:10.3390/en18030753
- [9] Vega Puga, D., Ramírez, M., & Trinidad, L. (2022). Techno-economic analysis of electro-methanation systems: Costs, emissions, and efficiency. *Energies*, 15(5), 1608. doi:10.3390/en15051608
- [10] Lee, K. (2024). Comparative life-cycle assessment of synthetic methane from different CO₂ sources. *Energies*, 17(11), 4478. doi:10.3390/en17114478
- [11] Zhang, Y., Xu, L., & Li, D. (2025). Intensified micro-bubble reactors for biological methanation enhancement. *Chemical Engineering Journal*, 480, 152715. doi:10.1016/j.cej.2024.152715
- [12] Bachmann, T., Schmidt, P., Ziegler, F., & Müller, C. (2023). Life-cycle greenhouse gas assessment of synthetic methane pathways: Comparison of

- power-to-gas and syngas routes. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11(3), 2183–2196. doi:10.1021/acssuschemeng.2c05390
- [13] Linden, D., & Reddy, T. B. (Eds.). (2020). *Handbook of batteries* (4th ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- [14] Dunn, B., Kamath, H., & Tarascon, J.-M. (2011). Electrical energy storage for the grid: A battery of choices. *Science*, 334(6058), 928–935. doi:10.1126/science.1212741
- [15] Skyllas-Kazacos, M., & Menictas, C. (2013). The vanadium redox flow battery: Technology and applications. In J. Yan (Ed.), *Handbook of clean energy systems* (Vol. 1, pp. 1–25). Wiley.
- [16] Yang, C., Zhang, Y., & Wang, X. (2019). Metal–air batteries: Fundamentals, progress, and perspectives. *Energy Storage Materials*, 20, 199–221. doi:10.1016/j.ensm.2019.04.024
- [17] Kaur, A. P., Sood, N., & Sekhon, S. S. (2022). Recent progress in sodium–sulfur batteries: A review. *Journal of Energy Storage*, 46, 103848. doi:10.1016/j.est.2021.103848

BÖLÜM 35

Tahıl Kaynaklı Arabinoksilanlar: Yapı, Ekstraksiyon ve Sağlık Üzerine Etkileri

Hilal Arslan Bayrakcı¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Selçuk Üniversitesi, Karapınar Aydoğanlar Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, Konya, Türkiye, ORCID: 0000-0003-0069-4164

GİRİŞ

Diyet ile insan sağlığı arasındaki bağlantı önem kazandıkça liflerin sağlık üzerindeki olumlu etkileri giderek daha belirgin hale gelmektedir. Liflerin farklı özellikleri (örneğin, yapı, çözünürlük, viskozite vb.) ile sağlık yararları arasındaki net ilişki hâlâ belirsizdir. Bununla birlikte, liflerin prebiyotik olarak işlev gördüğü ve insan sağlığını olumlu yönde etkilediği konusunda bir fikir birliği vardır. Prebiyotikler, bakterilerin büyümesini teşvik eden ve mikrobiyota değişikliği ile ilişkili hastalıkların azaltılmasıyla korelasyon gösteren bileşenlerdir (Cunningham vd., 2021; Gill vd., 2021).

Son on yılda küresel pazarda satışa sunulan tam tahıl ürünlerinin sayısı önemli ölçüde artmıştır (Jonnalagadda, 2013). Tam tahıl tüketimi, lipid ve kolesterol birikimini azaltabilir, periferik insülin direncini zayıflatır ve probiyotiklerin bolluğunu artırabilir; bu da kardiyovasküler hastalık, diyabet ve gastrointestinal kanser riskini azaltabilir (Bakken vd., 2016; Han vd., 2018; H. Kim vd., 2017; Kyrø vd., 2018; Malin vd., 2019; H. Wu vd., 2015; Y. Xu vd., 2018, 2019). Bunun potansiyel bir nedeni, tam tahılların yüksek seviyelerde olan ve rafine tahıl üretimi sırasında ayrılan diyet lifi içermesidir (Wang vd., 2020). Tahıl bazlı lif; arabinoksilanlar, β -glukanlar, fruktanlar ve selüloz gibi nişasta dışı polisakkaritlerin yanı sıra dirençli nişasta ve lignin içerir (Kamal-Eldin vd., 2009; Slavin, 2010; Zhang & Hamaker, 2010). Arabinoksilanlar, β -glukanlar, fruktanlar ve dirençli nişasta, kolon mikrobiyotası üzerindeki faydalı etkileri nedeniyle genellikle prebiyotik olarak kabul edilirler (Slavin, 2010; Van den Abbeele vd., 2011; Zhang & Hamaker, 2010). Nişasta dışı karbonhidratlar arasında, arabinoksilanlar buğdayda baskın, β -glukanlar arpa ve yulafı çok daha yüksek oranlarda bulunur (Mares & Stone, 1973; Slavin, 2010; Stone, 2009; Zhang & Hamaker, 2010).

Arabinoksilanlar, buğday, mısır, çavdar, arpa, pirinç, yulaf ve sorgum gibi çeşitli tahıl tanelerinde bulunan önemli bir diyet lifi kaynağıdır (Comino vd., 2016; Tian vd., 2015). Arabinoksilanlar, genellikle pentozanlar olarak adlandırılır ve buğday tanesindeki tüm nişasta dışı polisakkaritlerin yaklaşık %85'ini oluşturur (Mares & Stone, 1973).

Beslenme açısından, tahıl arabinoksilanları, selüloz, β -1,3;1,4-glukan, arabinogalakatan peptid ve lignin ile tahıl tanelerinin diyet lifi fraksiyonunun ana bileşeni oldukları için özel bir dikkat gerektirmektedir (Devries vd., 1999; McCleary, 2003). Bu durum özellikle önemlidir çünkü tahıl lifi, genel olarak diğer kaynaklardan elde edilen diyet lifine göre, büyük ölçekli prospektif çalışmalara dayanarak; kardiyovasküler hastalıklar (Jensen vd., 2004; Mozaffarian vd., 2003), tip II diyabet (Montonen vd., 2003; Schulze vd., 2007) ve gastrointestinal kanser (Mendez vd., 2007; Schatzkin vd., 2007) gibi kronik yaşam tarzı hastalıklar ile ilişkilendirilmiştir (Poutanen vd., 2008).

(Izydorczyk vd., 2003; Zheng vd., 2011) ve arpa hücre duvarlarının yaklaşık %25-40'ını temsil eder (Lazaridou vd., 2008). Mısır da arabinoksilanların iyi bir kaynağıdır, ancak üzerinde buğday veya arpadan elde edilen arabinoksilanlardan çok daha az çalışılmıştır (Saulnier vd., 1995; Yadav, Johnston, vd., 2007; Yadav, Moreau, vd., 2007). Mısır kepeğinin yaklaşık %51'i arabinoksilan olarak tanımlanmıştır veya kalan nişasta dikkate alınmazsa bu oran %67'dir (Saulnier vd., 1995). Buğday arabinoksilanlarında arabinosil yan zincirlerinin ksilan omurgasına rastgele bağlandığı, arpanın arabinoksilanlarında hafif kümelenmiş olduğu, yulaf arabinoksilanlarında ise sürekli olarak değiştirilmiş bölgeler oluşturacak şekilde kümelandığı bildirilmiştir (Tian vd., 2015). Kabuksuz arpa unundan elde edilen arabinoksilanın A/X oranı 0,76 olup, kabuksuz arpa kepeğinden elde edilen arabinoksilanın oranından (0,55) daha yüksektir (Zheng vd., 2011).

Çözünürlüğüne göre iki tip arabinoksilan vardır: su ile ekstrakte edilebilen arabinoksilanlar ve su ile ekstrakte edilemeyen arabinoksilanlar. Suda çözünenler toplam arabinoksilanların küçük bir kısmıdır ve hücre duvarı yüzeyine gevşek bir şekilde bağlıdır, suda çözünmeyenler ise en bol bulunan kısımdır ve diğer hücre duvarı bileşenlerine bağlıdır (Ganguli & Turner, 2008; Gebruers vd., 2008; Izydorczyk & Biliaderis, 1992; Z. Zhang vd., 2014). Hücre duvarında bulunan ve proteinler, lignin ve selüloz gibi diğer bileşenlere kovalent ve kovalent olmayan bağlarla bağlı olan suda çözünmeyen arabinoksilanlarda, bu bağları çözmek alkali çözeltilerin kullanılmasını gerektirir (Huang vd., 2024).

Enzimatik, kimyasal ve fiziksel işlemler gibi çeşitli ekstraksiyon yöntemleri yapısal çeşitliliği etkileyebilir (Döring vd., 2016). Farklı tahıl kaynakları ve ekstraksiyon yöntemleri, çeşitli moleküler ağırlıklara, dallanma türlerine ve derecelerine, ayrıca farklı bağlı ferulik asit içeriklerine sahip arabinoksilanlar elde edilmesine yol açabilir ve bu yapısal özellikler arabinoksilanların biyolojik aktivitelerini etkiler. Birkaç araştırma türü, alkali işlemin arabinoksilanların fonksiyonel grubunu etkilediğini, ferulik asit içeriğini düşürdüğünü ve arabinoksilanların doğal molekül ağırlığını koruduğunu göstermiştir. Öte yandan, enzimatik işlem daha düşük molekül ağırlıklı ancak daha yüksek ferulik asit içeriğine sahip arabinoksilanlar üretmiştir (Zhou vd., 2010). Ekstrüzyon pişirme gibi fiziksel işlemler arabinoksilanların glikozidik bağlarını kırarak polimerizasyon derecesini düşürdüğü için arabinoksilanların molekül ağırlığını azaltmıştır (Nyman, 2002).

2. Arabinoksilanların ekstraksiyon yöntemleri

Tahıllardan arabinoksilanların ekstraksiyonu, tahılların farklı kısımlarından ve çeşitli teknikler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Arabinoksilanların çıkarıldığı en yaygın kaynak, tahıl kepeğidir; burada arabinoksilanların konsantrasyonu en yüksektir (toplam kepeğin %10 ile %25'i arasında) (Dornez vd., 2006; Hemery vd., 2007; Izydorczyk vd., 2003; Kaur vd., 2019; Zheng vd., 2011).

Arabinoksilanların ekstraksiyonu su ile ekstraksiyon, mekanik ekstraksiyon, kimyasal ekstraksiyon, enzimatik ekstraksiyon veya bu tekniklerin kombinasyonları ile gerçekleştirilir (Chen vd., 2019; Fadel vd., 2018; Izydorczyk & Biliaderis, 1995; Yadav vd., 2017; Z. Zhang vd., 2014).

2.1. Arabinoksilanların su ile ekstraksiyonu

Arabinoksilanların su ile ekstraksiyonu, arabinoksilanın doğal yapısını koruyabilen en kolay ve en az agresif ekstraksiyon yöntemidir. Arabinoksilanın suda çözünürlüğü, tahıl türü, filizlenme derecesi ve tahılı oluşturan polimerlerin doğası gibi birkaç faktöre bağlıdır (Lazaridou vd., 2008; Mudgil & Barak, 2013). Bu faktörler, su ile ekstraksiyon yapıldığında arabinoksilanların verimini etkilemektedir. Ekstraksiyon prosedürü, öğütülmüş tanelerin (veya tane fraksiyonlarının) sabit bir süre boyunca (genellikle daha düşük sıcaklıklar kullanıldığında daha uzun) 45 ila 90 °C arasında değişen sıcaklıklarda suya yerleştirilmesiyle arabinoksilanların çözündürülmesini içerir (Gao vd., 2021; Izydorczyk vd., 1998; Lazaridou vd., 2008; Shang vd., 2021). Bu çözelti daha sonra organik bir çözücü kullanılarak çökeltirilir. Tanelerin endojen enzimlerini etkisizleştirmek için, numuneler ayrıca sulu bir etanol çözeltisiyle (%80 v / v) önceden işlenebilir (Lazaridou vd., 2008). Ekstraksiyondan sonra, çözünmeyen polimerler santrifüjleme ile uzaklaştırılır. Arabinoksilanlar açısından zengin olan üstteki sıvı, arabinoksilanlar açısından zengin bir pelet (Lazaridou vd., 2008) ve diğer suda çözünür polimerleri tutmak için doğrudan liyofilize edilebilir. Bunu aşmak için, ilk santrifüjlemeyi izleyen alternatif bir adım gerçekleştirilebilir. Üstteki sıvıdaki arabinoksilanlar, sabit bir süre boyunca (genellikle 12 saat) yaklaşık 4 °C'de %95 etanol veya başka bir organik çözücü ile çökeltilebilir, ardından santrifüjleme ve kurutma adımları izlenebilir (Paesani, Degano, vd., 2020; Shang vd., 2021). Ekstraksiyon için kullanılan ham maddeye bağlı olarak, nişasta ve diğer karbonhidratlar gibi diğer polimerlerin uzaklaştırılması gerekebilir ve genellikle bu polimerleri hedef alan özel enzimler kullanılarak gerçekleştirilir (Izydorczyk vd., 1998). Bu ekstraksiyon yöntemlerinin başlıca sınırlayıcı faktörü, potansiyel olarak çözünür arabinoksilanlar ile hücre duvarı matrisinin diğer polimerleri arasındaki çapraz bağların kırılmaması ve ekstraksiyon veriminin sınırlanmasıdır (Izydorczyk & Biliaderis, 1995b). Bu nedenle, çözünürlüğü artırmak için arabinoksilanların su ile ekstraksiyonunu mekanik işlemlerle birleştirmek daha cazip olabilir (Zannini vd., 2022).

2.2. Arabinoksilanların mekanik ekstraksiyonu

Mekanik ekstraksiyon, arabinoksilanların daha erişilebilir hale getirilmesiyle ekstraksiyon verimini artırmaya yardımcı olur. Ayrıca, öğütme ve ekstrüzyon (Andersson vd., 2017; Demuth vd., 2020; Jacquemin vd., 2012, 2015), ultrason (Görgüç vd., 2019; Reis vd., 2015; Wang vd., 2014), mikrodalga (Coelho vd., 2014; Minjares-Fuentes vd., 2016; Roos vd., 2009) veya buhar basıncı (Demuth vd., 2020) gibi diğer mekanik işlemler de mevcuttur. Bir arabinoksilan

ekstraksiyonu öncesinde tahıl unlarının/kepeğinin öğütülmesi ve ekstrüzyonu, su ile ekstrakte edilebilir arabinoksisanların verimini artırabilir. Ancak, bu tür mekanik işlemler arabinoksisanların yapısını da etkileyebilir ve arabinoksisanın yer değiştirme derecesini önemli ölçüde azaltabilir (Demuth vd., 2020).

Ultrason teknolojisinin uygulanması, arabinoksisan ekstraksiyonu için bir diğer başarılı yaklaşımdır. Bu teknoloji, hedeflenen verime ulaşmak için gereken süreyi (saatlerden dakikalara) önemli ölçüde azaltabilir (Görgüç vd., 2019; Wang vd., 2014). Kullanılan gücün kontrol edilmesi önemlidir, çünkü nispeten yüksek ultrason gücü ekstraksiyon verimini olumsuz etkileyebilir (Görgüç vd., 2019).

Mikrodalga teknolojisi, arabinoksisanların ekstraksiyonlarını iyileştirebilen benzersiz bir yaklaşımdır (Coelho vd., 2014; Minjares-Fuentes vd., 2016; Roos vd., 2009). Geleneksel ısıtma yöntemleriyle karşılaştırıldığında, mikrodalga destekli ekstraksiyonlar, ekstraksiyon sürelerini azaltmaya, verimliliği artırmaya, solvent tüketimini (uygulanırsa) azaltmaya ve enerji gereksinimlerini düşürmeye yardımcı olabilir (Davis vd., 2021). Davis vd. (2021) polisakaritlerin mikrodalga ile ekstraksiyonunun, ekstrakte edilen karbonhidratların molekül ağırlığı dağılımını ve nihai ekstrakt içindeki farklı polisakaritlerin göreceli bolluğunu etkileyebileceğini bildirmiştir. Ne yazık ki, arabinoksisanların mikrodalga ekstraksiyonu üzerindeki etkisi hakkında yeterli araştırma yoktur, çünkü mevcut literatür genellikle polisakaritlere bütün olarak odaklanmaktadır. Bu nedenle, mikrodalga ekstraksiyonunun arabinoksisanların üzerindeki etkisini daha iyi anlamak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

Un veya kepeğe buhar basıncı uygulaması da arabinoksisanların ekstrakte edilebilirliğini olumlu yönde etkileyebilir (Zannini vd., 2022). Örneğin, Kong vd. (2021) tarafından bildirildiğine göre, kepeğin buharda pişirilmesi, çözünebilir lifin ekstrakte edilebilirliğini artırmış ve çözünebilir diyet lifinin yüzdesi %4.57'den %9.10'a yükselmiştir; bu, Aktas-Akyildiz vd. (2017) çalışması ile uyumlu olup, buhar basıncı uygulamasından sonra arabinoksisanların su ile ekstrakte edilebilirliğinin %0.75'ten %2.06'ya yükseldiğini bildirmişlerdir. Benzer şekilde, Sui vd. (2018), buhar basıncının bazı çözünmez diyet liflerini çözünür lif haline dönüştürebileceğini ve böylece su ile ekstrakte edilebilirliği artırabileceğini bildirmiştir.

Literatürde giderek daha yaygın hale gelen bir diğer yaklaşım ise farklı mekanik işlemlerin birleştirilmesidir (Sillero vd., 2020; Singla & Sit, 2021; Wen vd., 2020). Ancak bu konudaki araştırmalar hala sınırlı olduğu için, daha iyi arabinoksisan ekstrakte edilebilirliği için farklı mekanik işlemlerin kombinasyonu hakkında çok şeyin anlaşılması gerekmektedir (Zannini vd., 2022).

2.3. Arabinoksilanların kimyasal ekstraksiyonu

Arabinoksilanların kimyasal ekstraksiyonu, alkali veya asidik çözelti kullanılarak gerçekleştirilebilir ve Zhang vd. (2014) tarafından iyi bir şekilde gözden geçirilmiştir. Arabinoksilanların kimyasal ekstraksiyon prosedürü, ham materyalin kimyasal çözeltide bekletilmesi ve belirli koşullar altında belirli bir süre boyunca ekstrakte edilmesi ile oluşur. Ekstraksiyondan sonra, katı kalıntının ayrılması gerekir; bu, santrifüjleme ile sağlanır (F. Xu vd., 2006; Yadav vd., 2017). Ekstraksiyon alkali bir solvent (sodyum hidroksit) kullanılarak yapıldığında, pelet istenmeyen bileşenleri temizlemek için birkaç kez yıkanır. Katı maddeler daha sonra arabinoksilanların zengin fraksiyonunu elde etmek için kurutulur (Yadav vd., 2017). Asidik bir solvent kullanıldığında, pelet atılır ve süpernatant, hemiselüloz çökmesini sağlamak için 95% etanolün üç katı hacmi ile işlenir. Pelet daha sonra santrifüjleme ile ayrılır ve kurutmadan önce asitli 70% etanol ile yıkanır, böylece arabinoksilanların zengin fraksiyonu elde edilir (F. Xu vd., 2006). Ekstraksiyon için kullanılan kimyasal maddeye bağlı olarak, bu adımlar değişiklik gösterebilir. Alkali çözücüler, kovalent ve hidrojen bağlarını bozar ve hücre duvarı matrislerini gevşetir, bu da yalnızca su ile ekstrakte edilemeyen hücre duvarındaki polisakaritlerin salınmasına neden olur (Cyran vd., 2004; Fincher & Stone, 1986). Alkali çözücüler ayrıca uronik asit kalıntılarının negatif forma dönüşümünü değiştirebilir, bu da arabinoksilanların ekstrakte edilebilirliğini artıran itme kuvvetlerini destekler (Greenfield & Southgate, 2003). Arabinoksilanların ekstraksiyonu için asidik çözücüler, alkali çözücüler kadar yaygın değildir çünkü bu çözücüler, ilgi alanındaki arabinoksilanlar üzerinde hidroliz etkisi yapabilir. Eğer kimyasal hidroliz kapsamlı ise, bazı arabinoksilanlar çok düşük molekül ağırlıklı arabinoksilanlara bozunabilir ve bu da organik çözücüde çözünerek verimin azalmasına yol açabilir (Cyran vd., 2004; Z. Zhang vd., 2014).

2.4. Arabinoksilanların enzimatik ekstraksiyonu

Endoksilanazlar ve selülozlar kullanılarak yapılan enzimatik ekstraksiyon, kimyasal yöntemler kadar etkili olabilir; bununla birlikte, çevre dostu olması ve arabinoksilan bozulmasının daha iyi kontrol edilebilmesi gibi avantajları vardır. İşlem koşulları, ekstrakte edilen arabinoksilanların verimini, molekül ağırlığını ve A/X oranını etkiler. Enzimatik etkinin arabinoksilanların ekstraksiyon verimi üzerindeki etkisi, enzim kaynağına ve konsantrasyonuna bağlıdır ve enzimlerin tek başına mı yoksa başka bir enzimle kombinasyon halinde mi kullanıldığına bağlıdır. Endoksilanazlar ve selülozların birlikte kullanımı, arabinoksilanların daha yüksek ekstraksiyon verimlerini sağlar (Escarnot vd., 2012; Ma vd., 2020). Daha yaygın bir yaklaşım, arabinoksilanların enzimatik ekstraksiyonunu diğer ekstraksiyon yöntemleriyle, genellikle alkali çözücülerle yapılan kimyasal ekstraksiyonlar ve kimyasal işlemlerle birleştirmektir (Chen vd., 2019; Roos vd., 2009; Wang vd., 2014). Enzimatik ekstraksiyon, ham materyalin su ile

çözünebilen arabinoksilanların ekstrakte edilmesinden sonra yapılabilir, böylece arabinoksilanların verimi maksimize edilebilir (Zannini vd., 2022).

3. Arabinoksilanların sağlık üzerine etkileri

Bu konuda yapılan araştırmalar, lif açısından zengin bir diyet uygulamanın sağlık açısından faydalarına işaret etmektedir (Zannini vd., 2022). Reynolds vd. (2019), mevcut çalışmaları sistematik bir inceleme ve meta-analizler yaparak karbonhidrat kalitesi ile bulaşıcı olmayan hastalıkların insidansı, mortalitesi ve risk faktörleri arasındaki ilişkileri ele almıştır. Mevcut verilere göre, günlük diyet lif alımını artırmak kardiyovasküler sorunlar, diyabet ve kanser riskini azaltmaktadır. Bunun yanı sıra, yeni bulgular diyet lifi tüketim alışkanlıklarının zihinsel sağlık (Kim vd., 2020; H. Xu vd., 2018) ve diğer bilişsel işlevlerle (Berding vd., 2021) ilişkili olduğunu göstermektedir.

Arabinoksilanlarla ilgili in vitro ve in vivo çalışmalarda prebiyotik etkiler bildirilmiştir. Lynch vd. (2021) tarafından son yıllarda yapılan çalışmada, bira atığından eş zamanlı olarak yürütülen sakkarifikasyon ve fermentasyon süreçleri aracılığıyla çözünür arabinoksilanlar elde edilmiştir. %99 çözünür arabinoksilan içeren bu lifler, in vitro dışkı fermentasyon denemeleri aracılığıyla mikrobiyom değiştirme yetenekleri açısından incelenmiştir. Yazarlar, elde edilen arabinoksilanların, *Lactobacillus* ve *bifidogenik* seviyelerde sırasıyla 2 kat ve 3.5 kat artış sağlayan prebiyotik etkiler gösterdiğini bulmuşlardır.

Arabinoksilanların prebiyotik etkisiyle ilgili olarak karşılaşılan sorun, mevcut çalışmaların ya in vitro ya da in vivo olmasıdır; yalnızca birkaç çalışma her iki yaklaşımı da uygulamaktadır (Paesani, Degano, vd., 2020). Lifin etkilerini araştıran in vitro çalışmaların, in vivo çalışmalardaki gözlemlerle her zaman örtüşmediği (Gill vd., 2021) göz önüne alındığında, bu durum etkileri hakkında bir uzlaşmaya ulaşmayı daha da zorlaştırmaktadır. Bir diğer değişken ise, in vivo insan denemelerinin genellikle arabinoksilanların diyetle takviye yoluyla dahil edilmesine dayanmasıdır; bu durum, gıda matrisinin arabinoksilanların etkisini nasıl etkileyebileceğini göz ardı etmektedir. Ayrıca, arabinoksilanların yapısının farklı gıda ürünlerinin fizikokimyasal özelliklerini etkileyebileceğini belirtmek önemlidir. Dolayısıyla, klinik çalışmalarda bildirilen umut verici sağlık yararlarına sahip arabinoksilanların, gıda matrislerine kolayca dahil edilemeyeceği ve bu durumun gıdanın kalitesini ve özelliklerini önemli ölçüde azaltabileceği, dolayısıyla tüketicilerin algısını etkileyebileceği durumu söz konusu olabilir. Bunun yanı sıra, mevcut insanları içeren klinik çalışmalar, katılımcıların diyetini tamamen kontrol etmemektedir (Zannini vd., 2022).

In vivo çalışmalarıyla ilgili dikkate alınması gereken önemli bir değişken, katılımcıların başlangıç mikrobiyotasıdır. Karmaşık polisakaritlerin parçalanmasında yer alan temel bakteriyel türlerden yoksun bir mikrobiyal topluluk, bu polimerleri parçalamada daha az etkili olma olasılığı taşımaktadır (Flint vd., 2017), bu da çalışmaların çıktısını etkilemektedir. Bu durum, farklı

coğrafi konumlara sahip gruplar için tamamen farklı sonuçlar bulan Wu vd. (2016) tarafından kanıtlanmıştır. Ancak, tüm bunlara rağmen, arabinoksilanların ana faydalı etkileri konusunda net bir konsensüs bulunmaktadır: kolonda bağırsak mikrobiyotasının düzenlenmesi yoluyla kısa zincirli yağ asitleri (SCFA'lar) üretiminin modifikasyonu, antioksidan kapasite ve hipoglisemik etki (Chen vd., 2019).

Kısa zincirli yağ asitlerinin oranı ve bolluğu, çalışmalarda kullanılan arabinoksilanların kimyasal yapısından etkilenen bağırsak mikrobiyota kompozisyonu ile korelasyon göstermektedir (Chen vd., 2019; Nguyen vd., 2020; Paesani, Sciarini, vd., 2020; Pereira vd., 2021; Zhang vd., 2021). In vivo çalışmalarda, kısa zincirli yağ asitlerinin konsantrasyonu ile ilgili veriler dikkatle değerlendirilmelidir (Zannini vd., 2022), çünkü dışkıdaki kısa zincirli yağ asitlerinin konsantrasyonları epitelin emme kapasitesi ve arabinoksilan tüketimi tarafından etkilenmektedir (Millet vd., 2010). Benzer gözlemler, Bach Knudsen & Hansen (1991) in domuzlarla yapılan bir in vivo çalışmasında bildirilmiştir. Bu durum arabinoksilan tüketen grup ile kontrol grubu arasında toplam kısa zincirli yağ asitleri konsantrasyonlarında anlamlı farklılıkların olmamasına yol açabilir (Zannini vd., 2022); bu, Nguyen vd. (2020) çalışmasında rapor edilmiştir. Ancak, diğer in vivo ve in vitro çalışmalar toplam kısa zincirli yağ asidi konsantrasyonunda bir artış bildirmiştir (Paesani, Sciarini, vd., 2020; Walton vd., 2012; X. Zhang vd., 2021). Bir insan müdahale çalışmasında, Walton ve arkadaşları (Walton vd., 2012) arabinoksilan-oligosakkarit açısından zengin ekmek tüketiminin etkilerini incelemiştir. Dışkıdaki bütirat içeriği ve dışkı bifidobakteri seviyelerinin arttığını bulmuşlardır.

Antioksidanlar açısından arabinoksilanlar, ferulik asit, kumarik asit ve diğer fenolik bileşiklerin kombinasyonu nedeniyle güçlü antioksidan aktivite gösterir (Y. Li & Yang, 2016). Antioksidan kapasitesi her arabinoksilan fraksiyonunun toplam fenolik içeriğiyle ilişkilidir (Bijalwan vd., 2016; Malunga & Beta, 2015). Arabinoksilanların fenolik asidi çoğunlukla arabinoz kalıntısına kovalent olarak bağlıdır ve genellikle büyük miktarda ferulik asit, biraz p-kumarik asit ve biraz kafeik asit içerir. Bazı özel arabinoksilan türlerinde ayrıca fitik asit, tanen ve antosiyaninler bulunur (Aguedo vd., 2014; Ayala-Soto vd., 2014; Bijalwan vd., 2016; Malunga & Beta, 2015; Revanappa & Salimath, 2011).

Arabinoksilanların antioksidan kapasitesinin, ferulik asidin arabinoksilanlar içinde bulunduğu durum (bağlı veya serbest) tarafından etkilendiği görülmektedir (Zannini vd., 2022); bağlı olduğunda daha yüksek antioksidan kapasite gözlemlenmiştir (Chen vd., 2019; Yuwang vd., 2018). Arabinoksilanların moleküler ağırlığı ve substitüsyon derecesi de antioksidan kapasiteyi etkilemektedir. Daha düşük molekül ağırlığı ve substitüsyon derecesine sahip arabinoksilanların gelişmiş antioksidan kapasiteye sahip olduğu görülmektedir (Chen vd., 2019; X. Zhang vd., 2021). Öte yandan, aynı yazarlar

arabinoksilanların hipoglisemik etkisinin, moleköl ağırlığı ve substitüsyon derecesi daha yüksek olduğunda daha iyi olduğunu bulmuşlardır (X. Zhang vd., 2021). Chen vd. (2017), arabinoksilanların lipid metabolizma bozukluklarını iyileştirdiğini ve lipid katabolizmasını aktive ederek ve lipid peroksidasyonunu baskılayarak karaciğer hasarını hafiflettiğini bulmuşlardır. Malunga vd. (2017), ferulik asitle esterleşmiş suda çözünen arabinoksilanlar açısından zengin diyetlerin, gastrointestinal sistemde oksidatif hasara karşı koruma sağladığını gözlemlemişlerdir. Genel olarak, arabinoksilanlardaki p-kumarik asit içeriği, arabinoksilanlarda ferulik asidi takip eden ikinci en yüksek fenolik asittir (Yuwang vd., 2018). Ayala-Soto vd. (2014), p-kumarik asidin aynı miktardaki ferulik aside kıyasla daha yüksek bir antioksidan kapasitesi uyguladığını bile göstermiştir.

Arabinoksilanların hipoglisemik etkisi, uzun zincirli karbonhidratları parçalayabilen ve sonrasında yemek sonrası kan şekeri seviyelerinde artışa neden olabilen α -amilaz aktivitesinin hafifletilmesiyle ilgilidir (Chen vd., 2019). Chen vd. (2019), arabinoksilan ekstraksiyon yöntemi ile hipoglisemik etkisi arasında bir bağlantı bulmuş ve alkali ile ekstrakte edilmiş arabinoksilanların (daha yüksek serbest ferulik asit miktarı içeren) daha yüksek α -amilaz inhibisyonu sağladığını bildirmiştir. Diğer çalışmalar, serbest ferulik asidin, esterleşmiş ferulik asitten daha yüksek bir inhibisyon gücüne sahip olduğunu sıçanların bağırsaklarında rapor etmiştir (Malunga vd., 2016). Hartvigsen vd. (2013) ile Boll vd. (2016) da arabinoksilanların sırasıyla sıçanlar ve insanlar üzerindeki kan glukoz yanıtını olumlu yönde etkilediğini bildirmiştir, ancak bu yazarlar ferulik asitten bahsetmemiştir.

Yukarıda belirtilen arabinoksilanların sağlık yararları nedeniyle, farklı gıda ve içeceklerde kullanılmasına yönelik ilgi artmaktadır. Ancak, çeşitli gıda matrislerine arabinoksilanların eklenmesine odaklanan çalışma sayısı hala sınırlıdır. Ayrıca, bu çalışmaların çoğu, arabinoksilanların saf bir bileşen olarak gıda sistemleri üzerindeki etkisini değil, arabinoksilan içeren lifler (örneğin, kepek) olarak incelemektedir (Zannini vd., 2022).

KAYNAKÇA

- Adams, E. L., Kroon, P. A., Williamson, G., Gilbert, H. J., & Morris, V. J. (2004). Inactivated enzymes as probes of the structure of arabinoxylans as observed by atomic force microscopy. *Carbohydrate Research*, 339(3). <https://doi.org/10.1016/j.carres.2003.11.023>
- Aguedo, M., Fougnyes, C., Dermience, M., & Richel, A. (2014). Extraction by three processes of arabinoxylans from wheat bran and characterization of the fractions obtained. *Carbohydrate Polymers*, 105, 317-324. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.01.096>
- Aktas-Akyildiz, E., Mattila, O., Sozer, N., Poutanen, K., Koksel, H., & Nordlund, E. (2017). Effect of steam explosion on enzymatic hydrolysis and baking quality of wheat bran. *Journal of Cereal Science*, 78, 25-32. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.06.011>
- Anderson, J. W. (2004). Whole grains and coronary heart disease: The whole kernel of truth. İçinde *American Journal of Clinical Nutrition* (C. 80, Sayı 6). <https://doi.org/10.1093/ajcn/80.6.1459>
- Andersson, A. A. M., Andersson, R., Jonsäll, A., Andersson, J., & Fredriksson, H. (2017). Effect of Different Extrusion Parameters on Dietary Fiber in Wheat Bran and Rye Bran. *Journal of Food Science*, 82(6), 1344-1350. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13741>
- Ayala-Soto, F. E., Serna-Saldívar, S. O., García-Lara, S., & Pérez-Carrillo, E. (2014). Hydroxycinnamic acids, sugar composition and antioxidant capacity of arabinoxylans extracted from different maize fiber sources. *Food Hydrocolloids*, 35, 471-475. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.07.004>
- Ayala-Soto, F. E., Serna-Saldívar, S. O., & Welti-Chanes, J. (2016). Effect of processing time, temperature and alkali concentration on yield extraction, structure and gelling properties of corn fiber arabinoxylans. *Food Hydrocolloids*, 60, 21-28. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.03.014>
- Bach Knudsen, K. E., & Hansen, I. (1991). Gastrointestinal implications in pigs of wheat and oat fractions. *British Journal of Nutrition*, 65(2), 217-232. <https://doi.org/10.1079/BJN19910082>
- Bakken, T., Braaten, T., Olsen, A., Kyrø, C., Lund, E., & Skeie, G. (2016). Consumption of whole-grain bread and risk of colorectal cancer among Norwegian women (The Nowac study). *Nutrients*, 8(1). <https://doi.org/10.3390/nu8010040>
- Barron, C., Bar-L'Helgouac'h, C., Champ, M., & Saulnier, L. (2020). Arabinoxylan content and grain tissue distribution are good predictors of the dietary fibre content and their nutritional properties in wheat products. *Food Chemistry*, 328, 127111. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127111>

- Berding, K., Carbia, C., & Cryan, J. F. (2021). Going with the grain: Fiber, cognition, and the microbiota-gut-brain-axis. *Experimental Biology and Medicine*, 246(7), 796-811. <https://doi.org/10.1177/1535370221995785>
- Bijalwan, V., Ali, U., Kesarwani, A. K., Yadav, K., & Mazumder, K. (2016). Hydroxycinnamic acid bound arabinoxylans from millet brans-structural features and antioxidant activity. *International Journal of Biological Macromolecules*, 88, 296-305. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.03.069>
- Boll, E. V. J., Ekström, L. M. N. K., Courtin, C. M., Delcour, J. A., Nilsson, A. C., Björck, I. M. E., & Östman, E. M. (2016). Effects of wheat bran extract rich in arabinoxylan oligosaccharides and resistant starch on overnight glucose tolerance and markers of gut fermentation in healthy young adults. *European Journal of Nutrition*, 55(4), 1661-1670. <https://doi.org/10.1007/s00394-015-0985-z>
- Chen, H., Chen, Z., Fu, Y., Liu, J., Lin, S., Zhang, Q., Liu, Y., Wu, D., Lin, D., Han, G., Wang, L., & Qin, W. (2019). Structure, Antioxidant, and Hypoglycemic Activities of Arabinoxylans Extracted by Multiple Methods from Triticale. *Antioxidants*, 8(12), 584. <https://doi.org/10.3390/antiox8120584>
- Chen, H., Lin, P., Emrith, K., Narayan, P., & Yao, Y. (2017). Ensemble-empirical-mode-decomposition based micro-Doppler signal separation and classification. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 56(4), 253. <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2017.089089>
- Coelho, E., Rocha, M. A. M., Saraiva, J. A., & Coimbra, M. A. (2014). Microwave superheated water and dilute alkali extraction of brewers' spent grain arabinoxylans and arabinoxylo-oligosaccharides. *Carbohydrate Polymers*, 99, 415-422. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.09.003>
- Comino, P., Collins, H., Lahnstein, J., & Gidley, M. J. (2016). Effects of diverse food processing conditions on the structure and solubility of wheat, barley and rye endosperm dietary fibre. *Journal of Food Engineering*, 169. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.08.037>
- Cunningham, M., Azcarate-Peril, M. A., Barnard, A., Benoit, V., Grimaldi, R., Guyonnet, D., Holscher, H. D., Hunter, K., Manurung, S., Obis, D., Petrova, M. I., Steinert, R. E., Swanson, K. S., van Sinderen, D., Vulevic, J., & Gibson, G. R. (2021). Shaping the Future of Probiotics and Prebiotics. *İçinde Trends in Microbiology* (C. 29, Sayı 8). <https://doi.org/10.1016/j.tim.2021.01.003>
- Cyran, M., Courtin, C. M., & Delcour, J. A. (2004). Heterogeneity in the Fine Structure of Alkali-Extractable Arabinoxylans Isolated from Two Rye Flours with High and Low Breadmaking Quality and Their Coexistence with Other Cell Wall Components. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(9), 2671-2680. <https://doi.org/10.1021/jf030550r>

- Davis, E. J., Spadoni Andreani, E., & Karboune, S. (2021). Production of Extracts Composed of Pectic Oligo/Polysaccharides and Polyphenolic Compounds from Cranberry Pomace by Microwave-Assisted Extraction Process. *Food and Bioprocess Technology*, 14(4), 634-649. <https://doi.org/10.1007/s11947-021-02593-3>
- Demuth, T., Betschart, J., & Nyström, L. (2020). Structural modifications to water-soluble wheat bran arabinoxylan through milling and extrusion. *Carbohydrate Polymers*, 240, 116328. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116328>
- Devries, J. W., Prosky, L., Li, B., & Cho, S. (1999). A Historical Perspective on Defining Dietary Fiber. *Cereal Foods World*, 44(5).
- Dornez, E., Gebruers, K., Wiame, S., Delcour, J. A., & Courtin, C. M. (2006). Insight into the Distribution of Arabinoxylans, Endoxylanases, and Endoxylanase Inhibitors in Industrial Wheat Roller Mill Streams. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(22), 8521-8529. <https://doi.org/10.1021/jf061728n>
- Döring, C., Jekle, M., & Becker, T. (2016). Technological and Analytical Methods for Arabinoxylan Quantification from Cereals. İçinde *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* (C. 56, Sayı 6). <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.749207>
- Escarnot, E., Aguedo, M., & Paquot, M. (2012). Enzymatic hydrolysis of arabinoxylans from spelt bran and hull. *Journal of Cereal Science*, 55(2), 243-253. <https://doi.org/10.1016/J.JCS.2011.12.009>
- Fadel, A., Mahmoud, A. M., Ashworth, J. J., Li, W., Ng, Y. L., & Plunkett, A. (2018). Health-related effects and improving extractability of cereal arabinoxylans. *International Journal of Biological Macromolecules*, 109, 819-831. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.11.055>
- Fincher, G. B., & Stone, B. A. (1986). Cell walls and their components in cereal grain technology. *Advances in cereal science and technology*, 8, 207-295.
- Flint, H. J., Duncan, S. H., & Louis, P. (2017). The impact of nutrition on intestinal bacterial communities. *Current Opinion in Microbiology*, 38, 59-65. <https://doi.org/10.1016/J.MIB.2017.04.005>
- Ganguli, N. K., & Turner, M. A. (2008). A simplified method for extracting water-extractable arabinoxylans from wheat flour. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88(11), 1905-1910. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3273>
- Gao, X., Ying, R., & Huang, M. (2021). Effects of lamellar organization and arabinoxylan substitution rate on the properties of films simulating wheat grain aleurone cell wall. *Carbohydrate Polymers*, 270, 117819. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117819>

- Gebruers, K., Dornez, E., Boros, D., Dynkowska, W., Bedő, Z., Rakszegi, M., Delcour, J. A., & Courtin, C. M. (2008). Variation in the Content of Dietary Fiber and Components Thereof in Wheats in the HEALTHGRAIN Diversity Screen. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(21), 9740-9749. <https://doi.org/10.1021/jf800975w>
- Gill, S. K., Rossi, M., Bajka, B., & Whelan, K. (2021). Dietary fibre in gastrointestinal health and disease. İçinde *Nature Reviews Gastroenterology and Hepatology* (C. 18, Sayı 2). <https://doi.org/10.1038/s41575-020-00375-4>
- Görgüç, A., Bircan, C., & Yılmaz, F. M. (2019). Sesame bran as an unexploited by-product: Effect of enzyme and ultrasound-assisted extraction on the recovery of protein and antioxidant compounds. *Food Chemistry*, 283, 637-645. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.077>
- Greenfield, H., & Southgate, D. A. T. (2003). *Food Composition Data: Production, Management, and Use*. FAO.
- Han, F., Wang, Y., Han, Y., Zhao, J., Han, F., Song, G., Jiang, P., & Miao, H. (2018). Effects of Whole-Grain Rice and Wheat on Composition of Gut Microbiota and Short-Chain Fatty Acids in Rats. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(25). <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b01891>
- Hartvigsen, M. L., Jeppesen, P. B., Lærke, H. N., Njabe, E. N., Knudsen, K. E. B., & Hermansen, K. (2013). Concentrated Arabinoxylan in Wheat Bread Has Beneficial Effects as Rye Breads on Glucose and Changes in Gene Expressions in Insulin-Sensitive Tissues of Zucker Diabetic Fatty (ZDF) Rats. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(21), 5054-5063. <https://doi.org/10.1021/jf3043538>
- Hemery, Y., Rouau, X., Lullien-Pellerin, V., Barron, C., & Abecassis, J. (2007). Dry processes to develop wheat fractions and products with enhanced nutritional quality. *Journal of Cereal Science*, 46(3), 327-347. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2007.09.008>
- Huang, M., Bai, J., Buccato, D. G., Zhang, J., He, Y., Zhu, Y., Yang, Z., Xiao, X., & Daglia, M. (2024). Cereal-Derived Water-Unextractable Arabinoxylans: Structure Feature, Effects on Baking Products and Human Health. *Foods*, 13(15), 2369. <https://doi.org/10.3390/foods13152369>
- Izydorczyk, M. S., & Biliaderis, C. G. (1992). Influence of structure on the physicochemical properties of wheat arabinoxylan. *Carbohydrate Polymers*, 17(3), 237-247. [https://doi.org/10.1016/0144-8617\(92\)90010-N](https://doi.org/10.1016/0144-8617(92)90010-N)
- Izydorczyk, M. S., & Biliaderis, C. G. (1995). Cereal arabinoxylans: advances in structure and physicochemical properties. *Carbohydrate Polymers*, 28(1), 33-48. [https://doi.org/10.1016/0144-8617\(95\)00077-1](https://doi.org/10.1016/0144-8617(95)00077-1)

- Izydorczyk, M. S., & Biliaderis, C. G. (2000). *Structural and functional aspects of cereal arabinoxylans and β -glucans* (ss. 361-384). [https://doi.org/10.1016/S0167-4501\(00\)80016-3](https://doi.org/10.1016/S0167-4501(00)80016-3)
- Izydorczyk, M. S., Jacobs, M., & Dexter, J. E. (2003). Distribution and Structural Variation of Nonstarch Polysaccharides in Milling Fractions of Hull-less Barley with Variable Amylose Content. *Cereal Chemistry*, 80(6), 645-653. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2003.80.6.645>
- Izydorczyk, M. S., Macri, L. J., & MacGregor, A. W. (1998). Structure and physicochemical properties of barley non-starch polysaccharides — I. Water-extractable β -glucans and arabinoxylans. *Carbohydrate Polymers*, 35(3-4), 249-258. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(97\)00137-9](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(97)00137-9)
- Jacquemin, L., Mogni, A., Zeitoun, R., Guinot, C., Sablayrolles, C., Saulnier, L., & Pontalier, P.-Y. (2015). Comparison of different twin-screw extraction conditions for the production of arabinoxylans. *Carbohydrate Polymers*, 116, 86-94. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.06.071>
- Jacquemin, L., Zeitoun, R., Sablayrolles, C., Pontalier, P.-Y., & Rigal, L. (2012). Evaluation of the technical and environmental performances of extraction and purification processes of arabinoxylans from wheat straw and bran. *Process Biochemistry*, 47(3), 373-380. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2011.10.025>
- Jensen, M. K., Koh-Banerjee, P., Hu, F. B., Franz, M., Sampson, L., Grønboek, M., & Rimm, E. B. (2004). Intakes of whole grains, bran, and germ and the risk of coronary heart disease in men. *American Journal of Clinical Nutrition*, 80(6). <https://doi.org/10.1093/ajcn/80.6.1492>
- Jonnalagadda, S. S. (2013). Whole Grains and Diet. İçinde L.-A. and P. V. B. Preedy Victor R. and Hunter (Ed.), *Diet Quality: An Evidence-Based Approach, Volume 1* (ss. 299-312). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7339-8_22
- Kamal-Eldin, A., Lærke, H. N., Knudsen, K. E. B., Lampi, A. M., Piironen, V., Adlercreutz, H., Katina, K., Poutanen, K., & Åman, P. (2009). Physical, microscopic and chemical characterisation of industrial rye and wheat brans from the Nordic countries. *Food and Nutrition Research*, 53(1). <https://doi.org/10.3402/fnr.v53i0.1912>
- Katapodis, P., Vardakou, M., Kalogeris, E., Kekos, D., Macris, B. J., & Christakopoulos, P. (2003). Enzymic production of a feruloylated oligosaccharide with antioxidant activity from wheat flour arabinoxylan. *European Journal of Nutrition*, 42(1), 55-60. <https://doi.org/10.1007/s00394-003-0400-z>
- Kaur, A., Yadav, M. P., Singh, B., Bhinder, S., Simon, S., & Singh, N. (2019). Isolation and characterization of arabinoxylans from wheat bran and study of

- their contribution to wheat flour dough rheology. *Carbohydrate Polymers*, 221, 166-173. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.06.002>
- Kim, C.-S., Byeon, S., & Shin, D.-M. (2020). Sources of Dietary Fiber Are Differently Associated with Prevalence of Depression. *Nutrients*, 12(9), 2813. <https://doi.org/10.3390/nu12092813>
- Kim, H., Yu, K. W., Hong, H. Do, & Shin, K. S. (2017). Effect of arabinoxylan- and rhamnogalacturonan I-rich polysaccharides isolated from young barley leaf on intestinal immunostimulatory activity. *Journal of Functional Foods*, 35. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.05.052>
- Kong, F., Wang, L., Chen, H., & Zhao, X. (2021). Improving storage property of wheat bran by steam explosion. *International Journal of Food Science & Technology*, 56(1), 287-292. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14630>
- Kyrø, C., Tjønneland, A., Overvad, K., Olsen, A., & Landberg, R. (2018). Higher whole-grain intake is associated with lower risk of type 2 diabetes among middle-aged men and women: The Danish diet, cancer, and health cohort. *Journal of Nutrition*, 148(9). <https://doi.org/10.1093/jn/nxy112>
- Lazaridou, A., Chornick, T., Biliaderis, C. G., & Izydorczyk, M. S. (2008). Sequential solvent extraction and structural characterization of polysaccharides from the endosperm cell walls of barley grown in different environments. *Carbohydrate Polymers*, 73(4), 621-639. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.01.001>
- Li, L.-Y., Wang, Y.-X., Zhang, T., Zhang, J.-F., Pan, M., Huang, X.-J., Yin, J.-Y., & Nie, S.-P. (2020). Structural characteristics and rheological properties of alkali-extracted arabinoxylan from dehulled barley kernel. *Carbohydrate Polymers*, 249, 116813. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116813>
- Li, Y., & Yang, C. (2016). Synthesis and properties of feruloyl corn bran arabinoxylan esters. *International Journal of Cosmetic Science*, 38(3), 238-245. <https://doi.org/10.1111/ics.12281>
- Lynch, K. M., Strain, C. R., Johnson, C., Patangia, D., Stanton, C., Koc, F., Gil-Martinez, J., O'Riordan, P., Sahin, A. W., Ross, R. P., & Arendt, E. K. (2021). Extraction and characterisation of arabinoxylan from brewers spent grain and investigation of microbiome modulation potential. *European Journal of Nutrition*, 60(8), 4393-4411. <https://doi.org/10.1007/s00394-021-02570-8>
- Ma, F., Li, X., Yin, J., Ma, L., & Li, D. (2020). Optimisation of double-enzymatic extraction of arabinoxylan from fresh corn fibre. *Journal of Food Science and Technology*, 57(12), 4649-4659. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04502-6>
- Malin, S. K., Kullman, E. L., Scelsi, A. R., Godin, J. P., Ross, A. B., & Kirwan, J. P. (2019). A Whole-Grain Diet Increases Glucose-Stimulated Insulin Secretion

Independent of Gut Hormones in Adults at Risk for Type 2 Diabetes. *Molecular Nutrition and Food Research*, 63(7). <https://doi.org/10.1002/mnfr.201800967>

- Malunga, L. N., & Beta, T. (2015). Antioxidant capacity of arabinoxylan oligosaccharide fractions prepared from wheat aleurone using *Trichoderma viride* or *Neocallimastix patriciarum* xylanase. *Food Chemistry*, 167, 311-319. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.07.001>
- Malunga, L. N., Eck, P., & Beta, T. (2016). Inhibition of Intestinal α -Glucosidase and Glucose Absorption by Feruloylated Arabinoxylan Mono- and Oligosaccharides from Corn Bran and Wheat Aleurone. *Journal of Nutrition and Metabolism*, 2016, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2016/1932532>
- Malunga, L. N., Izydorczyk, M., & Beta, T. (2017). Effect of water-extractable arabinoxylans from wheat aleurone and bran on lipid peroxidation and factors influencing their antioxidant capacity. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 10, 20-26. <https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2017.05.001>
- Mares, D. J., & Stone, B. A. (1973). Studies on wheat endosperm i. Chemical composition and ultrastructure of the cell walls. *Australian Journal of Biological Sciences*, 26(4). <https://doi.org/10.1071/B19730793>
- McCleary, B. V. (2003). Dietary fibre analysis. *Proceedings of the Nutrition Society*, 62(1), 3-9. <https://doi.org/10.1079/PNS2002204>
- Mendez, M. A., Pera, G., Agudo, A., Bas Bueno-de-Mesquita, H., Palli, D., Boeing, H., Carneiro, F., Berrino, F., Sacerdote, C., Tumino, R., Panico, S., Berglund, G., Manjer, J., Johansson, I., Stenling, R., Martinez, C., Dorronsoro, M., Barricarte, A., Tormo, M. J., ... González, C. A. (2007). Cereal fiber intake may reduce risk of gastric adenocarcinomas: The EPIC-EURGAST study. *International Journal of Cancer*, 121(7). <https://doi.org/10.1002/ijc.22896>
- Millet, S., Van Oeckel, M. J., Aluwé, M., Delezie, E., & De Brabander, D. L. (2010). Prediction of In Vivo Short-Chain Fatty Acid Production in Hindgut Fermenting Mammals: Problems and Pitfalls. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(7), 605-619. <https://doi.org/10.1080/10408390802565939>
- Minjares-Fuentes, R., Femenia, A., Garau, M. C., Candelas-Cadillo, M. G., Simal, S., & Rosselló, C. (2016). Ultrasound-assisted extraction of hemicelluloses from grape pomace using response surface methodology. *Carbohydrate Polymers*, 138, 180-191. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.11.045>
- Montonen, J., Knekt, P., Järvinen, R., Aromaa, A., & Reunanen, A. (2003). Whole-grain and fiber intake and the incidence of type 2 diabetes. *American Journal of Clinical Nutrition*, 77(3). <https://doi.org/10.1093/ajcn/77.3.622>
- Mozaffarian, D., Kumanyika, S. K., Lemaitre, R. N., Olson, J. L., Burke, G. L., & Siscovick, D. S. (2003). Cereal, Fruit, and Vegetable Fiber Intake and the

- Risk of Cardiovascular Disease in Elderly Individuals. *JAMA*, 289(13). <https://doi.org/10.1001/jama.289.13.1659>
- Mudgil, D., & Barak, S. (2013). Composition, properties and health benefits of indigestible carbohydrate polymers as dietary fiber: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 61, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2013.06.044>
- Nguyen, N. K., Deehan, E. C., Zhang, Z., Jin, M., Baskota, N., Perez-Muñoz, M. E., Cole, J., Tuncil, Y. E., Seethaler, B., Wang, T., Laville, M., Delzenne, N. M., Bischoff, S. C., Hamaker, B. R., Martínez, I., Knights, D., Bakal, J. A., Prado, C. M., & Walter, J. (2020). Gut microbiota modulation with long-chain corn bran arabinoxylan in adults with overweight and obesity is linked to an individualized temporal increase in fecal propionate. *Microbiome*, 8(1), 118. <https://doi.org/10.1186/s40168-020-00887-w>
- Nyman, H. (2002). Neuropsychological function in schizophrenia. *European Psychiatry*, 17, 187. [https://doi.org/10.1016/S0924-9338\(02\)80803-3](https://doi.org/10.1016/S0924-9338(02)80803-3)
- Paesani, C., Degano, A. L., Salvucci, E., Zalosnik, M. I., Fabi, J. P., Sciarini, L. S., & Perez, G. T. (2020). Soluble arabinoxylans extracted from soft and hard wheat show a differential prebiotic effect in vitro and in vivo. *Journal of Cereal Science*, 93, 102956. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.102956>
- Paesani, C., Sciarini, L. S., Moiraghi, M., Salvucci, E., Prado, S. B. R., Pérez, G. T., & Fabi, J. P. (2020). Human colonic in vitro fermentation of water-soluble arabinoxylans from hard and soft wheat alters Bifidobacterium abundance and short-chain fatty acids concentration. *LWT*, 134, 110253. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2020.110253>
- Pereira, G. V., Abdel-Hamid, A. M., Dutta, S., D'Alessandro-Gabazza, C. N., Wefers, D., Farris, J. A., Bajaj, S., Wawrzak, Z., Atomi, H., Mackie, R. I., Gabazza, E. C., Shukla, D., Koropatkin, N. M., & Cann, I. (2021). Degradation of complex arabinoxylans by human colonic Bacteroidetes. *Nature Communications*, 12(1), 459. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20737-5>
- Piironen, V., Lampi, A. M., Ekholm, P., Salmenkallio-Marttila, M., & Liukkonen, K. H. (2009). Micronutrients and Phytochemicals in Wheat Grain. *Inside Wheat: Chemistry and Technology: Fourth Edition*. <https://doi.org/10.1016/B978-1-891127-55-7.50014-8>
- Poutanen, K., Shepherd, R., Shewry, P. R., Delcour, J. A., Björck, I., & Van Der Kamp, J. W. (2008). Beyond whole grain: The European HEALTHGRAIN project aims at healthier cereal foods. *Cereal Foods World*, 53(1). <https://doi.org/10.1094/CFW-53-1-0032>
- Reis, S. F., Coelho, E., Coimbra, M. A., & Abu-Ghannam, N. (2015). Improved efficiency of brewer's spent grain arabinoxylans by ultrasound-assisted

- extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 24, 155-164. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.10.010>
- Revanappa, S. B., & Salimath, P. V. (2011). PHENOLIC ACID PROFILES AND ANTIOXIDANT ACTIVITIES OF DIFFERENT WHEAT (TRITICUM AESTIVUM L.) VARIETIES. *Journal of Food Biochemistry*, 35(3), 759-775. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4514.2010.00415.x>
- Reynolds, A., Mann, J., Cummings, J., Winter, N., Mete, E., & Te Morenga, L. (2019). Carbohydrate quality and human health: a series of systematic reviews and meta-analyses. *The Lancet*, 393(10170), 434-445. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31809-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31809-9)
- Roos, A. A., Persson, T., Krawczyk, H., Zacchi, G., & Stålbrand, H. (2009). Extraction of water-soluble hemicelluloses from barley husks. *Bioresource Technology*, 100(2), 763-769. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.07.022>
- Roubroeks, J. P., Andersson, R., & Åman, P. (2000). Structural features of (1→3),(1→4)-β-d-glucan and arabinoxylan fractions isolated from rye bran. *Carbohydrate Polymers*, 42(1), 3-11. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(99\)00129-0](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(99)00129-0)
- Saulnier, L., Marot, C., Chanliaud, E., & Thibault, J.-F. (1995). Cell wall polysaccharide interactions in maize bran. *Carbohydrate Polymers*, 26(4), 279-287. [https://doi.org/10.1016/0144-8617\(95\)00020-8](https://doi.org/10.1016/0144-8617(95)00020-8)
- Saulnier, L., Sado, P. E., Branlard, G., Charmet, G., & Guillon, F. (2007). Wheat arabinoxylans: Exploiting variation in amount and composition to develop enhanced varieties. *Journal of Cereal Science*, 46(3). <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2007.06.014>
- Schatzkin, A., Mouw, T., Park, Y., Subar, A. F., Kipnis, V., Hollenbeck, A., Leitzmann, M. F., & Thompson, F. E. (2007). Dietary fiber and whole-grain consumption in relation to colorectal cancer in the NIH-AARP Diet and Health Study. *American Journal of Clinical Nutrition*, 85(5). <https://doi.org/10.1093/ajcn/85.5.1353>
- Schulze, M. B., Schulz, M., Heidemann, C., Schienkiewitz, A., Hoffmann, K., & Boeing, H. (2007). Fiber and magnesium intake and incidence of type 2 diabetes: A prospective study and meta-analysis. *Archives of Internal Medicine*, 167(9). <https://doi.org/10.1001/archinte.167.9.956>
- Shang, X.-L., Liu, C.-Y., Dong, H.-Y., Peng, H.-H., & Zhu, Z.-Y. (2021). Extraction, purification, structural characterization, and antioxidant activity of polysaccharides from Wheat Bran. *Journal of Molecular Structure*, 1233, 130096. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.130096>
- Sillero, L., Prado, R., & Labidi, J. (2020). Simultaneous microwave-ultrasound assisted extraction of bioactive compounds from bark. *Chemical Engineering*

and Processing - Process Intensification, 156, 108100.
<https://doi.org/10.1016/J.CEP.2020.108100>

- Singla, M., & Sit, N. (2021). Application of ultrasound in combination with other technologies in food processing: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 73, 105506. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2021.105506>
- Slavin, J. (2004). Whole grains and human health. *Nutrition Research Reviews*, 17(1). <https://doi.org/10.1079/nrr200374>
- Slavin, J. (2010). Whole grains and digestive health. *Cereal Chemistry*, 87(4). <https://doi.org/10.1094/CCHEM-87-4-0292>
- Slavin, J. M. L. , J. D. , Jr. (2000). Consumption of whole-grain foods and decreased risk of cancer: proposed mechanisms. *Cereal Foods World*, 45(2), 54-58.
- Stone, B. , M. M. K. (2009). Carbohydrates. İçinde Khan K. and Shewry P. R. (Ed.), *Wheat: Chemistry and Technology* (4. bs, ss. 299-362). AACC International.
- Sui, W., Xie, X., Liu, R., Wu, T., & Zhang, M. (2018). Effect of wheat bran modification by steam explosion on structural characteristics and rheological properties of wheat flour dough. *Food Hydrocolloids*, 84, 571-580. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2018.06.027>
- Tian, L., Gruppen, H., & Schols, H. A. (2015). Characterization of (Glucurono)arabinoxylans from Oats Using Enzymatic Fingerprinting. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(50). <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b04419>
- Van den Abbeele, P., van de Wiele, T., & Possemiers, S. (2011). Prebiotic effect and potential health benefit of AX. *AgroFOOD industry hi-tech*, 22(2).
- Walton, G. E., Lu, C., Trogh, I., Arnaut, F., & Gibson, G. R. (2012). A randomised, double-blind, placebo controlled cross-over study to determine the gastrointestinal effects of consumption of arabinoxylan-oligosaccharides enriched bread in healthy volunteers. *Nutrition Journal*, 11(1), 36. <https://doi.org/10.1186/1475-2891-11-36>
- Wang, J., Bai, J., Fan, M., Li, T., Li, Y., Qian, H., Wang, L., Zhang, H., Qi, X., & Rao, Z. (2020). Cereal-derived arabinoxylans: Structural features and structure–activity correlations. İçinde *Trends in Food Science and Technology* (C. 96). <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.12.016>
- Wang, J., Sun, B., Liu, Y., & Zhang, H. (2014). Optimisation of ultrasound-assisted enzymatic extraction of arabinoxylan from wheat bran. *Food Chemistry*, 150, 482-488. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.10.121>
- Wen, L., Zhang, Z., Sun, D.-W., Sivagnanam, S. P., & Tiwari, B. K. (2020). Combination of emerging technologies for the extraction of bioactive compounds. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(11), 1826-1841. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1602823>

- Wu, G. D., Compher, C., Chen, E. Z., Smith, S. A., Shah, R. D., Bittinger, K., Chehoud, C., Albenberg, L. G., Nessel, L., Gilroy, E., Star, J., Weljie, A. M., Flint, H. J., Metz, D. C., Bennett, M. J., Li, H., Bushman, F. D., & Lewis, J. D. (2016). Comparative metabolomics in vegans and omnivores reveal constraints on diet-dependent gut microbiota metabolite production. *Gut*, 65(1), 63-72. <https://doi.org/10.1136/gutjnl-2014-308209>
- Wu, H., Flint, A. J., Qi, Q., Van Dam, R. M., Sampson, L. A., Rimm, E. B., Holmes, M. D., Willett, W. C., Hu, F. B., & Sun, Q. (2015). Association between dietary whole grain intake and risk of mortality: Two large prospective studies in US Men and Women. *JAMA Internal Medicine*, 175(3). <https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2014.6283>
- Xu, F., Liu, C. F., Geng, Z. C., Sun, J. X., Sun, R. C., Hei, B. H., Lin, L., Wu, S. B., & Je, J. (2006). Characterisation of degraded organosolv hemicelluloses from wheat straw. *Polymer Degradation and Stability*, 91(8), 1880-1886. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMDEGRADSTAB.2005.11.002>
- Xu, H., Li, S., Song, X., Li, Z., & Zhang, D. (2018). Exploration of the association between dietary fiber intake and depressive symptoms in adults. *Nutrition*, 54, 48-53. <https://doi.org/10.1016/J.NUT.2018.03.009>
- Xu, Y., Wan, Q., Feng, J., Du, L., Li, K., & Zhou, Y. (2018). Whole grain diet reduces systemic inflammation: A meta-analysis of 9 randomized trials. *İçinde Medicine (United States)* (C. 97, Sayı 43). <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000012995>
- Xu, Y., Yang, J., Du, L., Li, K., & Zhou, Y. (2019). Association of whole grain, refined grain, and cereal consumption with gastric cancer risk: A meta-analysis of observational studies. *Food Science and Nutrition*, 7(1). <https://doi.org/10.1002/fsn3.878>
- Yadav, M. P., Johnston, D. B., Hotchkiss, A. T., & Hicks, K. B. (2007). Corn fiber gum: A potential gum arabic replacer for beverage flavor emulsification. *Food Hydrocolloids*, 21(7), 1022-1030. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2006.07.009>
- Yadav, M. P., Kale, M. S., Hicks, K. B., & Hanah, K. (2017). Isolation, characterization and the functional properties of cellulosic arabinoxylan fiber isolated from agricultural processing by-products, agricultural residues and energy crops. *Food Hydrocolloids*, 63, 545-551. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.09.022>
- Yadav, M. P., Moreau, R. A., & Hicks, K. B. (2007). Phenolic acids, lipids, and proteins associated with purified corn fiber arabinoxylans. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(3). <https://doi.org/10.1021/jf0624493>
- Yuwang, P., Sulaeva, I., Hell, J., Henniges, U., Böhmendorfer, S., Rosenau, T., Chitsomboon, B., & Tongta, S. (2018). Phenolic compounds and antioxidant

- properties of arabinoxylan hydrolysates from defatted rice bran. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(1), 140-146. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8448>
- Zannini, E. ;, Bravo Núñez, Á. ;, Sahin, A. W. ;, Arendt, E. K., Aiello, F., Carullo, G., Zannini, E., Bravo Núñez, Á., Sahin, A. W., & Arendt, E. K. (2022). *Citation: Arabinoxylans as Functional Food Ingredients: A Review*. <https://doi.org/10.3390/foods11071026>
- Zhang, G., & Hamaker, B. R. (2010). Cereal carbohydrates and colon health. İçinde *Cereal Chemistry* (C. 87, Sayı 4). <https://doi.org/10.1094/CCHEM-87-4-0331>
- Zhang, X., Xie, J., Chen, T., Ma, D., Yao, T., Gu, F., Lim, J., Tuinstra, M. R., & Hamaker, B. R. (2021). High arabinoxylan fine structure specificity to gut bacteria driven by corn genotypes but not environment. *Carbohydrate Polymers*, 257, 117667. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2021.117667>
- Zhang, Z., Smith, C., & Li, W. (2014). Extraction and modification technology of arabinoxylans from cereal by-products: A critical review. *Food Research International*, 65, 423-436. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.05.068>
- Zhou, S., Liu, X., Guo, Y., Wang, Q., Peng, D., & Cao, L. (2010). Comparison of the immunological activities of arabinoxylans from wheat bran with alkali and xylanase-aided extraction. *Carbohydrate Polymers*, 81(4), 784-789. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.03.040>

BÖLÜM 36

İnsan Makine Etkileşimi ve Yapay Zekada Vicdan Kavramı: Güncel Etik Yaklaşımlar

Cihan Yalçın¹

1. Giriş

İnsan makine etkileşimi basit komut girişlerinden karmaşık yetki devirlerine uzanan radikal bir dönüşüm geçiriyor. Bu süreç, konuyu arayüz tasarımı problemi olmaktan çıkarıp, doğrudan bir güvenlik ve sorumluluk matrisine evrilmiştir. Karar destek sistemleri veri setlerindeki örüntüleri öğrenirken, ne yazık ki insana dair değer yargılarını ve toplumsal önyargıları da teknik katmanlara taşıyabiliyor. İşte bu noktada vicdan kavramını, romantik bir söylemden ziyade yapay zekâ sistemlerinin adalet ve zarar vermeme ilkeleriyle (non-maleficence) uyumlu çalışmasını sağlayan bir 'fren mekanizması' olarak kurguluyoruz. Floridi ve ekibinin (2018) öne sürdüğü şekilde insan odaklı etik perspektif, sistemin başarı kriterlerini salt doğruluk gibi sığ metriklerin ötesine taşımayı şart koşar. Amaç fonksiyonu, insan haklarını ve toplumsal etkileri de kapsayacak genişlikte kurgulanmalıdır.

Vicdanın teknik karşılığı modelin çıktısını otomatik olarak doğru kabul eden bir akış yerine, hatayı öngören ve hatanın etkisini sınırlayan mühendislik yaklaşımıdır. Güvenlik kritik sistemlerde kullanılan risk temelli yaklaşım artık karar destek yapay zekâ sistemleri için de zorunlu hale gelmektedir. Etik yönetişimi ilke beyanından çıkarıp ölçülebilir kontrol noktalarına bağlamak gerekir. Risk temelli yaklaşım, yapay zekâ sistemlerinin yaşam döngüsü boyunca risk tanımlama, kanıt üretme ve izleme adımlarını zorunlu bir mühendislik faaliyeti haline getirir (National Institute of Standards and Technology, 2023; International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission, 2023). Bu yaklaşım vicdanı soyut bir iyi niyet beyanı olmaktan çıkarıp ölçülebilir bir risk kontrol parametresine dönüştürür. Alan yazını incelendiğinde Huang ve ekibinin (2023) koyduğu teşhis oldukça nettir: Etik prensiplerin teoriden pratiğe dökülmesinde ciddi bir tıkanıklık yaşanıyor. Bu darboğazı aşmanın tek yolu ise kendini kanıtlamış, sağlam doğrulama ölçütlerini devreye sokmaktır. Hatalı kod üretimi, halüsinasyon veya veri sızıntısı gibi tehditler, klasik ayrımcılık riskleriyle birleşerek hibrit bir tehdit ortamı yaratıyor. Dünya Ekonomik Forumu'nun 2025 raporunda dezenformasyonun 'en yüksek riskler' sınıfına alınması tesadüf değildir. Bu sebeple vicdan meselesini artık kişisel bir ahlak tercihi gibi değil, kurumlar ölçeğinde işleyen kritik bir güven protokolü olarak konumlandırmak zorundayız. Ghosh (2025) ve Ismail & Ahmad (2025) gibi araştırmacıların da işaret ettiği üzere mevcut yönetim çerçeveleri parçalı kalmakta ve algoritmik şeffaflık konusunda hala somut mühendislik çözümlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Üretken yapay zekâ teknolojileriyle beraber risk sahası epey büyümüştür. Artık sadece veri işleyen değil aynı zamanda metin, görsel ve kod yaratabilen modellerin yaygınlaşması söz konusu. Mevcut durum inandırıcı dezenformasyon

haberleri, telif hakları sorunları, kişisel veri ihlalleri ve hatalı bilgi üretimi gibi riskleri ve karar sistemlerinin geleneksel ayrımcılık sorunlarıyla aynı zemine indirgemektedir. Dünya Ekonomik Forumu'nun yayınladığı 2025 Küresel Riskler Raporu yanlış bilgi ve dezenformasyonun kısa ve orta vadede en büyük tehditlerden biri olduğunu vurgularken, yapay zekâ kaynaklı olumsuz çıktıların bu riskleri nasıl beslediğine dikkat çekmektedir (World Economic Forum, 2025). Gelineen nokta, vicdanı sadece bireyin iç hesaplaşması olmaktan çıkarıyor. Artık bu kavramı, salt bireysel ikilemlerle sınırlamadan, kurumsal karar mekanizmalarının ve toplumsal güvenin merkezinde duran bir yapı olarak tartışmayı gerekli kılmaktadır. Ghosh (2025), etik alanındaki tartışmaların giderek derinleşmesine karşın uygulama cephesinde risklerin bütüncül bir yaklaşımla azaltılmasının hâlâ zorlu bir süreç olduğunu not düşmektedir. İsmail ve Ahmad (2025) ise yönetim çerçevelerindeki parçalanmışlığa odaklanarak, algoritmik önyargı ve şeffaflık eksikliğinin sürekli tekrar eden kronikleşmiş problemler olduğunu kanıtlamaktadır.

Bu çalışma ile insan makine etkileşimi ve yapay zekâda vicdan olgusunu güncel etik literatürle sentezleyerek, mühendislik pratikleri açısından uygulanabilir, risk odaklı ve somut bir çerçeve sunmaktır. Buradaki temel iddia vicdanın bir soyutlama olarak kalmaması gerektiğidir. Vicdan, veri seti seçimi, model eğitimi, değerlendirme, dağıtım ve izleme adımlarında somut kontrol noktaları ile karşılık bulmalıdır. İnsan denetimi, açıklanabilirlik, ölçülebilir adalet metrikleri ve olay sonrası hesap verebilirlik mekanizmaları, bu kontrol noktalarının çekirdeğini oluşturur.

2. İnsan Makine Etkileşiminin Evrimi ve Güncel Yapay Zekâ Dönüşümü

Etkileşimin ilk evrelerinde komut girişi ve sonuç görüntüleme gibi deterministik süreçler hakimdi. Sistem davranışları tasarımcının kodladığı kurallar bütünüyle sınırlıydı ve hatalar genellikle sistem içi istisnalar (exception) olarak ele alınırdı. Ancak makine öğrenmesi tabanlı sistemlere geçiş, bu deterministik yapıyı geri dönülemez biçimde kırmıştır. Artık modeller, sabit kurallar yerine veriden türetilen parametrelerle hareket etmekte; aynı girdi setine farklı bağlamlarda değişken tepkiler verebilmektedir. Öngörülebilirliğin ve kontrol hissinin zayıfladığı bu yeni düzende, denetim ihtiyacı hiç olmadığı kadar artmıştır. Yapay zekâ sistemleri özellikle karar destek ve karar otomasyonu alanında, kullanıcı ile sistem arasındaki ilişkiyi araç kullanımı düzeyinden yetki devri düzeyine taşımıştır. Bu yetki devrinin mühendislik açısından iki temel sonucu bulunmaktadır. Birinci sonuç etkileşimin artık yalnızca kullanılabilirlik testi ile değerlendirilememesidir. Kullanıcı hatası ile model hatası arasındaki sınırlar bulanıklaşır. İkinci sonuç ise sistemin sorumluluk paylaşımının

karmaşıklılaşmasıdır. İnsan faktörü sistemin sunduğu önerileri sadece tasdik eden bir operatör rolüyle sınırlandığında, hatalı kararların kökeni teknik olarak açıklanabilse dahi sürecin doğurduğu kurumsal ve yasal sorumluluklar karmaşıklılaşır. UNESCO'nun 2021 tarihli Yapay Zekâ Etiği Tavsiye Kararı, teknoloji üretim süreçlerinin merkezine insan onuru ve haklarını yerleştirerek bu duruma ilkesel bir çerçeve çizer (UNESCO, 2021). Bu yeni perspektif ile etkileşim tasarımı yalnızca kullanıcı tatminine odaklanan dar bir alandan çıkarak potansiyel zararları minimize etmeyi önceleyen bir güvenlik stratejisine evrilmektedir.

İnsan odaklı geliştirme pratiklerinde kritik eşik, karar anının tek bir model çıktısına hapsedilmemesidir. Amershi ve arkadaşlarının (2019) insan yapay zekâ etkileşimi için çizdiği rehber ilkeler sistemin sınırlarının kullanıcıya hissettirilmesi, belirsizliğin şeffaflaşması ve hatayı tolere edecek geri bildirim döngülerinin kurulması gerektiğini savunur. Vicdan kavramının teknik zemini tam da burada güçlenir. Zira vicdan salt doğruyu fısıldayan bir iç ses değil, yanlış yapmanın mümkün olduğu gerçeğiyle inşa edilmiş güvenlik katmanlarıdır. Ancak burada karşımıza çıkan asıl meydan okuma, bu etik tartışmaların somut mühendisliğe nasıl tercüme edileceğidir. Sahadaki uygulama araçlarının bu denli çeşitlenmesi, değerlendirme yöntemlerinin de ortak bir standarta bağlanmasını zorunlu kılıyor. Ortega Bolaños ve arkadaşlarının (2024) yaptığı kapsamlı inceleme bu durumu teyit eder niteliktedir. Araştırmacılar yapay zekâ sistemlerinin denetiminde kullanılan etik araçları derinlemesine incelediğinde, araç çeşitliliğinin bolluğuna rağmen bunları çatısı altında toplayacak bütüncül bir standardın halen eksik olduğu sonucuna varmıştır. Bu tespit ile mühendislik tasarımı süreçlerinde ölçütlerin herhangi bir muğlaklığa yer bırakmaksızın somut ve açık biçimde tanımlanmasını şart koşmaktadır.

Üretken yapay zekâ, etkileşimi bir adım daha ileri taşımıştır. Modelin çıktı üretmesi yalnızca karar önermek değil, içerik üretmek anlamına da gelmektedir. Bu durum, insan makine etkileşiminde yeni bir risk alanı açar. Kullanıcı, üretken modelin verdiği metin veya öneriyi doğrulamadan kullanmaya daha yatkın hale gelebilir. Sistem, doğru biçimde ifade edilen yanlış bilgiyi yüksek güvenle sunabilir. Bu nedenle denetim, yalnızca sonuç doğruluğu değil, içerik güvenilirliği ve kaynak izlenebilirliği üzerinden de ele alınmalıdır. Dünya Ekonomik Forumu (2025) raporunun dezenformasyon riskine yaptığı vurgu, üretken yapay zekâ ile etkileşimde doğrulama katmanlarının mühendislik gereği haline geldiğini desteklemektedir. Geline nokta yapay zekâ entegrasyonu ile birlikte insan-makine etkileşimi, basit bir arayüz sorunundan karmaşık bir denetim problemine dönüşmüştür. Vicdan kavramı bu denetim problemini çözecek şekilde tasarlanmış açıklanabilirlik, insan denetimi, hata toleransı ve risk

temelli yönetim bileşenlerinin bütünü temsil eder. İlerleyen bölümlerde bu bileşenlerin karar verme mekanizmaları içinde nasıl konumlandırılacağı, önyargı ve hata kaynakları üzerinden detaylandırılacaktır.

3. Yapay Zekâda Karar Verme Mekanizmaları ve Önyargı

Mühendislik açısından yapay zekâ destekli karar süreçleri, özünde birer 'tahmin fonksiyonu optimizasyonu' problemidir. Hedef değişken, bir veri seti üzerinden tahmin edilerek eyleme veya sınıflandırmaya dönüştürülür. Çoğu sistem, eğitim fazında bir kayıp fonksiyonunu (loss function) minimize etmeye çalışır. Ancak burada veri dağılımı, etiketleme hassasiyeti ve örnekleme metodolojisi, karar sınırlarını (decision boundary) doğrudan belirleyen faktörlerdir. Dolayısıyla hatanın kök nedeni, genellikle modelin mimari karmaşıklığından ziyade veri setinin temsil kabiliyetinde yatar. Mehrabi ve arkadaşları (2021) önyargı ve adalet literatürünü geniş bir çerçevede sınıflandırırken, veri kaynağına ilişkin önyargıların, modelleme aşamasındaki teknik tercihlerle birleştğinde sistematik adaletsiz sonuçlar üretebildiğini göstermektedir.

Algoritmik önyargı sıklıkla yalnızca veri setinde temsil sorunu olarak yorumlanmaktadır. Mühendislik açısından bakıldığında hedef fonksiyon seçimi, etiketleme politikası, eşikleme ve hata maliyeti tanımı da önyargıyı doğrudan büyütebilmektedir. Gerçek dünyaya yansıyan vakalar bu mekanizmanın nasıl işlediğini görünür kılar. Amazon'un işe alım algoritmasını rafa kaldırmasıyla sonuçlanan vaka (Dastin, 2018), veri seti ve etiket geçmişinin model kararlarını nasıl zehirlediğinin somut bir örneğidir. Buradaki sorun sistemin teknik işlevsizliği değil; geçmiş verilerdeki cinsiyet eşitsizliğini bir 'başarı kriteri' olarak öğrenip güçlendirmesidir. Model, cinsiyet bilgisini açıkça kullanmasa bile, veri içindeki dolaylı korelasyonlar (proxy variables) üzerinden ayrımcı örüntüleri yeniden üretmiştir. Vicdanı bir tasarım hedefi haline getiren bağlam da budur: Veri seti analizi, adalet metrikleri ve insan denetimi, modelin belirli grupları sistematik olarak dışlamasını engellemek için bir arada çalışmalıdır.

Önyargı meselesi sadece işe alım gibi sosyal süreçlerde değil yüz tanıma veya kimlik doğrulama gibi son derece teknik alanlarda da ciddi sonuçlar doğuruyor. Literatürdeki pek çok çalışma bu sistemlerin farklı demografik gruplar üzerinde performans uçurumları yarattığını tartışmaya açmıştır. Bu tartışmaların sahadaki karşılığı net şekilde, model değerlendirme raporları ve veri seti dökümantasyonu artık bir tercih değil, zorunluluktur. Gebru ve ekibi (2018), veri setlerinin motivasyonunu ve sınırlarını belgeleyen 'veri fişleri' (datasheets) yöntemini önerirken; Mitchell ve arkadaşları (2019) modelin güvenilir olduğu senaryoları tanımlayan 'model kartları' yaklaşımını geliştirmiştir. Her iki yöntem de vicdan kavramını teknik dokümantasyon ve denetim pratiğine bağlar. Zira teknik

anlamda vicdan, sadece hata yapmamak değil; hata olasılığının nerede yükseldiğini şeffafça raporlayabilmektir.

Üretken yapay zekâ döneminde bu problem daha karmaşık hale gelir. Büyük dil modelleri veya üretken modeller, çok geniş veri kaynaklarından öğrenir. Bu veri kaynakları içinde önyargılı dil kalıpları, dışlayıcı söylemler, yanlış bilgi ve telif ihlali içeren içerikler bulunabilir. Bender ve arkadaşlarının (2021) tartışmaya açtığı üzere; dil modellerinin ölçeği büyüdükçe veri kalitesi ve temsil sorunları derinleşmekte, bu da etik riskleri katlamaktadır. Söz konusu durum, üretken sistemlerde vicdan kavramını içerik güvenliği ve doğrulama mekanizmalarıyla ilişkili hale getirir. Bertoncini ve ekibi (2023), etik filtrelemenin son kullanıcı inisiyatifine bırakılamayacağını, bunun sistem mimarisinin doğal bir parçası olması gerektiğini savunur. Mevcut literatür taraması tartışmanın artık soyut ilke yazımından sıyrılıp somut uygulama ve yönetim sahalarına evrildiğini kanıtlar niteliktedir. İsmail ve Ahmad (2025) ile Ghosh (2025) gibi araştırmacılar hâlihazırdaki yönetim çerçevelerinde göze çarpan boşluklara ve metodolojik yetersizliklere dikkat çekerek, teknik katmanlarla kurumsal süreçlerin entegrasyonunun şart olduğunu vurgulamaktadır.

Son dönemdeki akademik çalışmalar konunun artık ilke manifestoları yayınlamaktan öteye geçip, somut uygulama ve yönetim sahalarına taşındığını ispatlıyor. İsmail ve Ahmad (2025) ile Ghosh (2025), mevcut çerçevelerin dağınık yapısına ve metodolojik gediklere parmak basarak, teknik katmanlar ile kurumsal mimarinin entegre edilmesini zorunlu kılıyor. Özellikle İsmail ve Ahmad (2025), algoritmik önyargı ve şeffaflık sorunlarının bir türlü aşılamayıp yönetim şemsiyesi altında sürekli tekrar ettiğini belirtirken; Ghosh (2025), etik risklerin düşürülmesinde kurumsal eksikliklerin hâlâ sürdüğünü not düşüyor. Madanchian ve ekibi (2025) ise iş dünyasında sorumlu yapay zekâ entegrasyonunun, ancak teorik etik ile pratik yönetim modellerinin harmanlanmasıyla mümkün olacağını savunuyor. Tüm bu kaynaklar vicdan kavramının mühendislik ve yönetim arasında kritik bir köprü vazifesi görmesi gerektiği tezini doğrulamaktadır. Bulgular açıkça göstermektedir ki yapay zekâda vicdan etik bir süsleme değil, teknik bir mecburiyettir. Veri kusurları, temsil boşlukları ve algoritmik tercihler, çıktıyı doğrudan şekillendirir. Buna istinaden vicdan, eğitim verisinin şeffaflığı, model sınırlarının raporlanması ve insan denetim döngüsünün (human-in-the-loop) tasarıma gömülmesiyle somutlaştırılmalıdır.

4. Vicdan Kavramının Yapay Zekâda Teknik Temsili ve Denetim Katmanı Tasarımı

Vicdan kavramı bu çalışmada soyut bir etik söylem olarak değil, karar üreten bir yapay zekâ sisteminin güvenilirliğini artıran ve zarar üretme olasılığını azaltan

mühendislik bileşenleri bütünü olarak ele alınmaktadır. Bu yaklaşımda vicdan, karar üretim hattının üzerine yerleştirilen bir denetim katmanı ile karşılık bulmaktadır. Denetim katmanının amacı, model çıktısının doğrudan eyleme dönüşmesini engellemek, belirsizlik ve risk göstergeleri yükseldiğinde insan denetimini zorunlu kılmak, sistem davranışını kayıt altına almak ve geriye dönük inceleme yapılmasına imkân sağlamaktır. Bu çerçevede, güvenlik kritik alanlarda kullanılan risk azaltma mantığının karar destek yapay zekâ sistemlerine aktarılması olarak değerlendirilmektedir.

Karar mekanizmasının teknik bileşenleri incelendiğinde denetim gereksinimi üç kritik noktada ortaya çıkmaktadır. Birinci nokta veri setidir. Veri seti temsiliyeti zayıf olduğunda, veri toplama sürecinde ölçüm yanlılığı bulunduğu, etiketler tarihsel kararların kalıntısı olduğunda veya sınıf dağılımı dengesiz olduğunda modelin karar sınırı hatalı biçimde konumlanabilmektedir (Barocas & Selbst, 2016; Mehrabi, Morstatter, Saxena, Lerman, & Galstyan, 2021). İkinci nokta modelleme seçimleridir. Kayıp fonksiyonu, eşik değeri, kalibrasyon stratejisi, örnek ağırlıklandırma ve veri artırma tercihleri belirli gruplarda hatayı büyütebilmektedir (Hardt, Price, & Srebro, 2016). Üçüncü nokta dağıtım ortamıdır. Dağıtım kayması, kavram kayması, kullanıcı davranışının değişmesi ve kötüye kullanım girişimleri modelin eğitimde görülmeyen hatalar üretmesine neden olabilmektedir. Bu sebeple denetim katmanının yalnızca geliştirme aşamasında değil, dağıtım sonrası izleme aşamasında da etkin olması gerekmektedir (National Institute of Standards and Technology, 2023; International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission, 2023).

Denetim katmanı tasarımında teknik olarak uygulanabilir bir yapı, dört alt işlev üzerinden kurulmaktadır. Birinci işlev doğrulama ve tutarlılık kontrolüdür. Model çıktısının hedef alan kurallarıyla uyumlu olup olmadığı kontrol edilmekte, aşırı uç değerler, çelişkili öneriler ve kullanıcı girdisiyle tutarsız sonuçlar filtrelenmektedir. İkinci işlev belirsizlik farkındalığıdır. Tahmin olasılığı, marjinal sınıflandırma uzaklığı, ansambl yöntemleri veya Monte Carlo yaklaşımı gibi yöntemlerle belirsizlik tahmin edilmekte, belirsizlik yükseldiğinde otomatik karar yerine insan onayı zorunlu hale getirilmektedir. Üçüncü işlev açıklanabilirlik ve izlenebilirliktir. Kararın hangi özelliklerden etkilendiği yerel açıklama teknikleriyle raporlanmakta, model kartları ve veri seti fişleri ile sistemin sınırları dokümanite edilmektedir (Gebru ve arkadaşları, 2018; Mitchell ve arkadaşları, 2019; Ribeiro, Singh, & Guestrin, 2016; Lundberg & Lee, 2017). Dördüncü işlev olay kaydı ve denetim izidir. Karar verildiği anın girdileri, model sürümü, kullanılan veri seti sürümü, eşik değerleri ve açıklama çıktıları loglanmakta, böylece olay sonrası kök neden analizi mümkün hale

getirilmiştir. Bu yaklaşım, kurumsal ölçekte hesap verebilirlik mekanizmasının teknik temelini oluşturmaktadır.

Bu teknik temsil, vicdan kavramını doğrudan bir mimari bileşene bağlamaktadır. İnsan denetimi yalnızca kullanıcı arayüzüne bir uyarı eklenmesi şeklinde değil, karar hattının kritik noktalarında zorunlu durdurma ve onay mekanizması olarak kurgulanmaktadır. Sağlık, işe alım, kredi skorlama ve kamu hizmetleri gibi alanlarda bu zorunluluk daha da belirgin hale gelmektedir. Bu alanlarda hatanın maliyeti yükselmekte, yanlış pozitif veya yanlış negatif kararların insan hayatına ve toplumsal adalete etkisi büyümektedir.

Denetim katmanının sürdürülebilirliği, sürekli öğrenme ve sürümleme disiplini gerektirmektedir. Modelin güncellenmesi, veri setinin genişlemesi veya kullanım bağlamının değişmesi durumunda adalet metrikleri ve hata maliyeti analizleri tekrar edilmelidir. Bu süreç, bir defalık etik uygunluk değerlendirmesi ile sınırlı kalmamalıdır. Sonuç olarak vicdan, mühendislikte sürekli doğrulama ve bakım kavramlarıyla birlikte düşünülmelidir. Bu bölümün sonunda temel çıkarım şu şekilde ifade edilmektedir. Yapay zekâda vicdan, modelin insan gibi hissetmesi ile ilgili değildir. Yapay zekâda vicdan, modelin hata üretme olasılığına karşı tasarımın içine yerleştirilmiş bir güvenlik mimarisidir. Bu mimari, veri seti, algoritma ve dağıtım ortamı kaynaklı riskleri ölçmeyi ve sınırlamayı hedeflemektedir.

5. Vaka Örnekleri Üzerinden Risk, Önyargı ve Güven Kaybı Analizi

Yapay zekâ sistemlerinde hata ve önyargı çoğu zaman model doğruluğunun düşük olmasından değil, risk zincirinin kontrol edilmemesinden kaynaklanmaktadır. Risk zinciri, amaç tanımı, veri seti tasarımı, modelleme tercihleri, değerlendirme metrikleri, dağıtım kararları ve izleme mekanizmalarının birbiri üzerine eklenmesiyle oluşmaktadır. Zincirin herhangi bir halkası zayıf kaldığında, modelin ürettiği çıktı sahada sistematik zarara dönüşebilmektedir. Buradan hareketle vaka örnekleri etik tartışma amacıyla değil risk zincirinin hangi noktada kırılması gerektiğini göstermek amacıyla ele alınmıştır. Bu mimari çerçevenin gerçek hayattaki karşılığı risk zincirinin farklı uygulama alanlarında nasıl kırılabildiği incelendiğinde daha net biçimde ortaya çıkmaktadır.

İşe alım süreçlerinde görülen risk veri setinin tarihsel kararları taşıması ile başlamaktadır. Geçmiş işe alım verilerinde belirli grupların daha az temsil edilmesi veya geçmişteki değerlendirme pratiklerinin ayrımcı örüntüler içermesi, modelin bu örüntüleri performans hedefi gibi öğrenmesine neden olabilmektedir. Bu riskin kurumsal ölçekte görünür hale gelmesi, işe alım gibi yüksek etkili alanlarda etik kaygıların teknik tasarım kararlarıyla doğrudan bağlantılı olduğunu

göstermektedir (Ghosh, 2025). Amazon'un yapay zekâ destekli işe alım aracında ortaya çıkan cinsiyet temelli olumsuz eğilim, veri temsili ve hedef değişken seçimi kaynaklı bir risk zinciri örneği olarak değerlendirilmektedir (Dastin, 2018). Bu zincirde kritik kırılma noktası, alt grup performans raporlarının ve veri seti fişlerinin tasarımın zorunlu çıktısı haline getirilmesidir. Veri seti fişi yaklaşımı, veri kaynağının, kapsama alanının ve sınırlılıkların standart biçimde raporlanmasını sağlar (Gebru ve arkadaşları, 2018). Model kartları ise modelin hangi koşullarda güvenilir olduğunun açıkça yazılmasını hedefler (Mitchell ve arkadaşları, 2019). Bu çıktılar üretilmediğinde hata, sahada ortaya çıkana kadar görünmez kalabilmektedir.

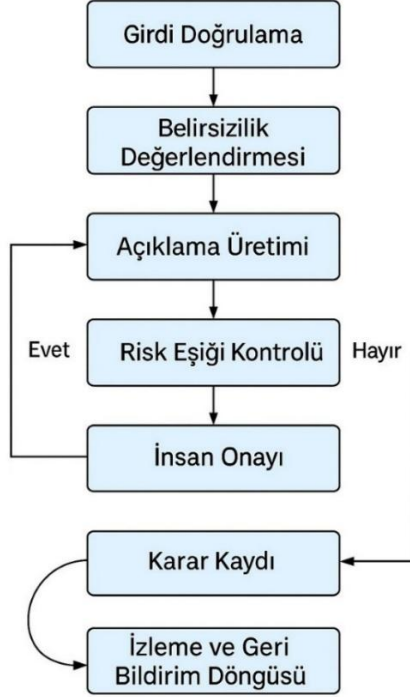
Sağlık alanında görülen risk zincirinde ise temel problem hedef değişkenin yanlış temsil edilmesidir. Sağlık ihtiyacını doğrudan ölçmek yerine maliyeti hedefleyen risk skorları, aynı klinik ihtiyaca sahip bireyler arasında sistematik farklı sonuçlar üretebilmektedir. Obermeyer ve arkadaşlarının çalışması, maliyet temelli hedef seçiminin belirli gruplarda hizmete erişimi düşürebilecek sonuçlara yol açabileceğini göstermiştir (Obermeyer, Powers, Vogeli, ve Mullainathan, 2019). Bu vaka, amaç tanımı ile değerlendirme metriği seçimlerinin etik etki ürettiğini göstermektedir. Zincirin kırılması, hedef değişkenin problem bağlamına uygun biçimde tanımlanması, alt grup düzeyinde hata maliyetinin ölçülmesi ve insan onayı eşiklerinin belirlenmesi ile mümkün hale gelmektedir.

Biyometrik doğrulama ve yüz tanıma uygulamalarında risk zinciri daha çok temsiliyet ve değerlendirme tasarımı üzerinden oluşmaktadır. Veri setinin belirli demografik grupları eksik temsil etmesi ve değerlendirme metriklerinin yalnızca genel doğruluğa odaklanması, alt gruplarda hata oranlarının yükselmesine neden olabilmektedir. Bu durumun ticari sistemlerdeki yansımalarını tartışan çalışmalar, demografik gruplar arasında doğruluk farklarının pratik sonuçlar doğurabileceğini göstermiştir (Buolamwini ve Gebru, 2018). Bu zincirde kırılma noktası, alt grup bazlı performans raporlarının zorunlu hale getirilmesi, eşik değerlerinin uygulama bağlamına göre ayarlanması ve kararın tek bir model çıktısına indirgenmemesidir.

Üretken yapay zekâ sistemleri, risk zincirine yeni bir halka eklemektedir. Çıktının ikna edici biçimde yanlış bilgi içermesi, istem manipölasyonu ile zararlı içerik üretilmesi ve kaynak izlenebilirliğinin zayıflaması, güven kaybını hızlandırmaktadır (Bender ve arkadaşları, 2021; Weidinger ve arkadaşları, 2022). Bu zincirde kırılma noktası doğrulama katmanıdır. Doğrulama katmanı, kaynak gereksinimi, belirsizlik ifadesi, güvenlik testleri ve dağıtım sonrası izleme ile birlikte tasarlanmalıdır. Üretken sistemlerde risk, yalnızca modelin içerik üretmesiyle değil, bu içeriğin iş akışına kontrolsüz biçimde girmesiyle büyümektedir. Dünya ölçeğinde dezenformasyon riskinin öne çıkması,

doğrulama ve izleme adımlarının kurumsal süreçlere gömülmesi gerektiğini göstermektedir (World Economic Forum, 2025). Karar hattı boyunca konumlandırılan kontrol kapıları ve önerilen denetim akışı Şekil 1’de şematize özetlenmektedir.

Şekil 1. Vicdan denetim katmanı akış şeması



Vaka örnekleri birlikte okunduğunda ortak sonuç ortaya çıkmaktadır. Vicdan, soyut bir değer söylemi değildir. Vicdan, risk zincirinin kırılacağı kontrol noktalarını tasarımın içine yerleştirmektir. Amaç tanımı, veri seti belgeleri, alt grup performans raporları, eşik yönetimi, doğrulama adımları ve izleme mekanizmaları birlikte işletildiğinde, hatanın sahada zarara dönüşme olasılığı düşmektedir.

6. Vicdan Denetim Katmanının Uygulanabilir Mimari Taslağı ve Uyum Gereksinimleri

Vicdan denetim katmanının uygulanabilir bir mühendislik çözümüne dönüşebilmesi için karar üretim hattı boyunca çalışan ve kanıt üreten bir kontrol mimarisi kurulmalıdır. Bu mimari, geliştirme sonunda eklenen bir uyum adımı olarak değil, tasarımın başından itibaren işletilen bir kalite ve güvenlik gereksinimi olarak ele alınmalıdır. Veri seti, model, dağıtım ortamı ve kullanıcı etkileşimi bileşenlerinde ayrı kontrol kapıları tanımlanmalı, her kapı ölçülebilir

çıktı üretmeli, bu çıktılar sürümleme disiplini ile saklanmalıdır. Böyle bir yaklaşım kurumsal karar hatasını azaltmaya odaklanan, izlenebilirliği yüksek ve denetlenebilir bir mühendislik düzeni sağlar.

Veri katmanında ilk gereksinim, veri setinin hangi popülasyonu temsil ettiğinin açıkça belgelenmesidir. Veri seti fişleri yaklaşımı, veri kaynağı, toplama yöntemi, kapsama alanı, sınırlılıklar ve uygun kullanım senaryolarının standart biçimde raporlanmasını hedeflemektedir (Gebru ve arkadaşları, 2018). Bu raporlar olmadan modelin hangi gruplarda performans düşüreceği öngörülemez hale gelmektedir. Etiketleme sürecinde ise etiketlerin hangi karar kuralına göre üretildiği, hangi hataların sistematik olabileceği ve hangi alanlarda etiket gürültüsünün yüksek olduğu belgelendirilmelidir. Bu noktada vicdan denetim katmanı, veri seti seviyesinde bir risk günlüğü üretmelidir. Risk günlüğü, veri setindeki temsil dengesizliğini, olası önyargı kaynaklarını ve kritik alt grupları teknik terimlerle tanımlamalıdır.

Model katmanında ikinci gereksinim, yalnızca genel doğruluk değil, alt grup performansı ve hata maliyeti üzerinden değerlendirme yapılmasıdır. Adalet metrikleri, alt grup bazlı yanlış pozitif ve yanlış negatif oranları, kalibrasyon farkları ve eşik duyarlılığı birlikte raporlanmalıdır (Hardt, Price, ve Srebro, 2016; Mehrabi ve arkadaşları, 2021). Model kartları yaklaşımı, modelin hangi koşullarda güvenilir olduğu ve hangi koşullarda dikkat gerektirdiği bilgisini standart biçimde sunmayı amaçlamaktadır (Mitchell ve arkadaşları, 2019). Bu raporlar vicdan denetim katmanının temel çıktılarıdır. Model geliştirme aşamasında belirsizlik ölçümü ve açıklanabilirlik çıktıları da karar hattına bağlanmalıdır. Yerel açıklama yöntemleri, kararın hangi özelliklere dayanarak üretildiğini raporlayabilmekte, böylece insan denetiminin rastgele değil hedefli biçimde çalışmasına imkân sağlamaktadır (Ribeiro, Singh, ve Guestrin, 2016; Lundberg ve Lee, 2017).

Dağıtım katmanında üçüncü gereksinim, izleme ve olay yönetiminin zorunlu bileşen olmasıdır. Dağıtım sonrası ortam, eğitim dağılımından sapma üretebilmektedir. Kullanım örüntüsü değiştiğinde modelin güvenilirliği düşebilmekte, kötüye kullanım girişimleri artabilmekte, üretken yapay zekâ sistemlerinde ise istem manipülasyonu gibi yeni saldırı türleri ortaya çıkabilmektedir. Bu bağlamda izleme faaliyeti, yalnızca performans metriği takibi değil, veri girişindeki kaymayı, model çıktısındaki risk göstergelerini ve kullanıcı geri bildirimlerini birlikte izleyen bir karar güvenliği döngüsüdür. Yapay zekâ risk yönetimi çerçeveleri, kurumların yönetim, ölçme, yönetme ve izleme adımlarını birlikte uygulamasını önermektedir (National Institute of Standards and Technology, 2023; International Organization for Standardization

& International Electrotechnical Commission, 2023). Kurumsal ölçeekte bu yaklaşım, vicdan denetim katmanının sürdürülebilirliğini sağlar.

Üretken yapay zekâ bağlamında vicdan denetim katmanı iki ek bileşen gerektirmektedir. Birinci bileşen, içerik güvenliği ve doğrulama kapılarıdır. Model çıktılarının kaynak izlenebilirliği, doğruluk kontrolü ve zararlı içerik filtreleme adımları birlikte işletilmelidir (Weidinger ve arkadaşları, 2022). İkinci bileşen, sistemik riskin yönetimidir. Temel modellerin çok sayıda ürün ve sürece aynı anda bağlanması, tekil bir hatanın ölçeklenmesine neden olmaktadır (Bommasani ve arkadaşları, 2021). Risklerin ölçeklenmesi sebebiyle model sürümler, erişim kontrolü, kullanım sınırları ve denetim izi üretimi, üretken sistemlerde klasik karar destek sistemlerinden daha yüksek öncelik taşımaktadır.

Bu çözüm paketi içinde vicdan denetim katmanının asgari çıktıları şu şekilde tanımlanmaktadır. Veri seti fişi, model kartı, alt grup performans raporu, belirsizlik raporu, açıklama çıktıları, kırmızı takım test raporu, izleme panosu ölçütleri ve olay günlüğü kayıtları birlikte üretilmelidir. Bu çıktılar, düzenleyici uyum tartışmasından bağımsız biçimde, doğrudan mühendislik kalitesinin bir parçasıdır. Düzenleyici çerçeveler bu çıktıları zorunluluğa dönüştürmektedir. Başlık düzeyinde bir mevzuat bölümü yerine, bu gereksinimlerin karar hattına nasıl gömüldüğü gösterildiğinde metin mühendis yaklaşımıyla uyumlu kalmaktadır. Elde edilen kontrol çıktıları yalnızca iç kalite güvencesi amacı taşımaz. Aynı zamanda kurumun risk yönetimi ve hesap verebilirlik yükünü taşıyan teknik kanıt setini oluşturur. Risk sinyalleri, kontrol adımları ve üretilen kanıt çıktıları birlikte tanımlandığında, üretken yapay zekâ riskleri ile uyum gereksinimleri aynı mühendislik hattı içinde yönetilebilir hale gelir.

Üretken yapay zekâ, metin, görüntü ve kod gibi içerikleri olasılıksal biçimde üreten modellerin yaygınlaşması ile birlikte insan makine etkileşiminin karar hattını genişletmiştir. Bu genişleme, klasik karar destek uygulamalarında görülen sınıflandırma hatalarının ötesine geçen yeni risk türlerini ortaya çıkarmaktadır. İçerik üretimi, modelin yalnızca bir sınıf etiketi üretmesi yerine, kullanıcı tarafından doğrudan eyleme dönüştürülebilecek öneriler ve çıktılar üretmesi anlamına gelmektedir (Bommasani ve arkadaşları, 2021). Bu durum, hatalı çıktının etkisini büyütmede ve hatanın kurumsal süreçlere taşınması halinde hızla çoğalan bir risk yapısı oluşturmaktadır.

Risk üretimi üç ana kanaldan beslenmektedir. Birinci kanal veri seti kaynaklı hatalardır. Veri setinin belirli grupları eksik temsil etmesi, etiketlerin tutarsız olması, toplama sürecindeki yanlışlık ve tarihsel kararların veri setine taşınması, modelin çıktısında sistematik sapmalar üretebilmektedir (Mehrabı ve arkadaşları, 2021). İkinci kanal algoritmik ve mimari tercihlerdir. Amaç fonksiyonu, optimizasyon stratejisi ve geri besleme ile yeniden eğitim süreçleri, önyargının

pekişmesine ve belirli çıktı kalıplarının aşırı güvenle üretilmesine neden olabilmektedir (Barocas & Selbst, 2016). Üçüncü kanal ise kullanım bağlamıdır. Model çıktısının hangi iş akışında, hangi kullanıcı yetkinliği ile ve hangi yetki düzeyinde kullanıldığı, riskin gerçek etkisini belirlemektedir. Aynı model çıktısı, düşük etkili bir öneri metni olarak kaldığında sınırlı zarar üretirken, işe alım, kredi değerlendirme, denetim ve güvenlik gibi alanlarda otomatik karar girdisi haline geldiğinde yüksek etkili bir hata kaynağına dönüşebilmektedir (Amershi ve arkadaşları, 2019).

Üretken sistemlere özgü riskler arasında ikna edici yanlış bilgi üretimi, kaynak izlenebilirliğinin zayıflaması, istem manipülasyonu, zararlı içerik üretimi, kişisel verilerin istem ve çıktı üzerinden sızdırılması ve fikri hak ihlali olasılıkları öne çıkmaktadır (Bender ve arkadaşları, 2021; Weidinger ve arkadaşları, 2022). Üretken yapay zekâ kaynaklı içerik güvenilirliği problemi, deepfake ve içerik kökeni doğrulama gereksinimini yönetim gündemine taşımış ve küresel standartlaşma ihtiyacını güçlendirmiştir (International Telecommunication Union, 2025). Bu riskler veri seti ve algoritma kaynaklı önyargı ile birleştiğinde hem hatalı hem de adaletsiz çıktılar üretebilen bir yapı oluşabilmektedir. Mühendislik açısından kritik gereksinim, riskin oluşmasını bekleyen reaktif yaklaşım yerine, dağıtım öncesi ve dağıtım sonrası kontrol noktaları ile kanıt üreten bir doğrulama düzeninin kurulmasıdır. Bu doğrulama düzeni metrik tabanlı testler, alt grup performans analizi, veri kökeni izlenebilirliği, açıklanabilirlik çıktıları ve olay yönetimi kayıtları ile desteklenmelidir (National Institute of Standards and Technology, 2023; National Institute of Standards and Technology, 2024).

Bu görünürlük için OECD tarafından önerilen sınıflandırma yaklaşımı, sistemin insanlar ve çevre üzerindeki etkisini, ekonomik bağlamını, veri ve girdi özelliklerini, modelin teknik karakteristiğini ve uygulama yaşam döngüsünü birlikte ele alan bir çerçeve sunmaktadır (Organisation for Economic Co-operation and Development, 2022). Çerçevede yer alan boyutlar, risk değerlendirmesinin yalnızca model başarımları ölçütleri ile sınırlı kalmaması gerektiğini ve kullanıcı yetkinliği, etkilenen paydaşlar, veri hakları ve düzeltme imkanları gibi alanların da teknik kontrol gereksinimleri doğruluğunu göstermektedir. Bu nedenle sınıflandırma çıktısı, hangi kontrol mekanizmalarının hangi sıklıkta uygulanacağını belirleyen bir mühendislik girdisi olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 1. OECD yapay zekâ sistem sınıflandırma boyutları üzerinden üretken yapay zekâ için risk sinyalleri, kontrol adımları ve üretilen kanıt çıktıları eşlemesi

OECD boyutu	Risk sinyali	Önerilen kontrol adımı	Üretilen kanıt çıktısı
İnsanlar ve çevre	Kullanıcı yetkinliği düşük, itiraz mekanizması yok	İnsan onayı koşulu ve itiraz akışı tanımlanması	Onay kayıtları ve itiraz günlüğü
Etkilenen paydaşlar	Alt gruplarda performans düşüşü	Alt grup performans raporu ve eşitlik testi	Alt grup metrik raporu
Veri ve girdi	Veri kökeni belirsiz, temsil sorunu var	Veri seti fişi, örnekleme denetimi, etiket kontrolü	Veri seti fişi ve denetim raporu
Model karakteristiği	Karar gerekçesi üretilmiyor	Açıklama üretimi ve izlenebilirlik kütüğü	Model kartı ve açıklama çıktısı
Görev ve çıktı	Yüksek etkili alanda otomatik karar kullanımı	Dağıtım öncesi stres testleri, güvenli varsayılanlar	Test raporu ve sınır değer tanımı
Yaşam döngüsü	Dağıtım sonrası sapma ve sürüklenme	İzleme, alarm, olay yönetimi ve geri alma	Olay kayıtları ve sürüm geri alma kaydı

Uyum gereksinimleri bu mühendislik yaklaşımını sahada zorunlu hale getiren dış kısıtlar olarak ele alınmalıdır. Denetim katmanı çıktıları teknik dokümantasyon, izleme, kayıt tutma, şeffaflık ve insan denetimi beklentilerini doğrudan karşılayacak kanıt paketleri üretmelidir (European Union, 2024). Risk temelli yönetim yaklaşımı, yalnızca mevzuat düzeyinde değil uluslararası politika belgelerinde de temel ilke olarak konumlandırılmıştır (Organisation for Economic Co-operation and Development, 2019). AB yapay zekâ yönetim modeli, pazar uyumu hedefleri ile temel hak korumasını risk temelli bir yapı içinde birleştirerek üretken ve genel amaçlı sistemleri de kapsayacak şekilde genişletilmiştir (Hulok, 2025). Bu çalışmada uyum gereksinimleri hukuk metni tartışması olarak değil tasarım kısıtları ve doğrulama yükümlülükleri olarak ele

alınmıştır. Üretken yapay zekâ sistemlerinin geliştirme ve işletim sürecinde, bu gereksinimlerin karşılığı veri seti fişleri ve model kartları, test raporları, izleme panelleri, olay kayıtları ve geri bildirimle güncellenen sürümleme disiplini olarak somutlaştırılmaktadır (Mitchell ve arkadaşları, 2019; National Institute of Standards and Technology, 2023). Şeffaflık ve teknik dokümantasyon yükümlülükleri, model çıktısı kadar modelin nasıl üretildiğini kanıtlayacak kayıt ve açıklama gereksinimlerini de güçlendirmektedir (Kalodanis ve arkadaşları, 2025).

7. Etik İlkelerden Uygulamaya Geçişte Tasarım İlkeleri ve Mühendislik Kontrol Noktaları

Etik tartışmaların önemli bir bölümü ilke düzeyinde kalmakta, bu ilkelerin mühendislik uygulamalarına dönüştürülmesi ise çoğu zaman gecikmektedir. İlke düzeyindeki ifadeler, sistem geliştirme sürecinde somut kontrol noktalarına dönüşmediğinde etik uyum bir niyet beyanı olarak kalabilmektedir. Bu nedenle vicdan kavramı, geliştirme yaşam döngüsüne gömülü, ölçülebilir ve denetlenebilir kontrol noktaları şeklinde ele alınmalıdır. Yapay zekâ etiğine dair genel çerçeveler, insan merkezli tasarım, zarar vermeme, adalet, şeffaflık ve hesap verebilirlik gibi başlıklarda birleşmektedir (Floridi ve arkadaşları, 2018; UNESCO, 2021). Etik ilkelerin uygulanabilirliğini yükselten araçların önemli bir bölümü, kontrol listeleri, metrik çerçeveleri ve yaşam döngüsü denetim şablonları üzerinde yoğunlaşmıştır (Ortega-Bolaños ve arkadaşları, 2024). Bu başlıklar mühendislikte kalite hedefleriyle eşleştirildiğinde uygulanabilir hale gelmektedir.

Uygulanabilir tasarım ilkeleri, dört temel kontrol noktasında toplanabilir. Birinci kontrol noktası amaç tanıımıdır. Modelin optimize edeceği hedef değişkenin yanlış seçilmesi, sistemin adaletsiz sonuçlar üretmesine neden olabilmektedir. Sağlık alanındaki risk skoru örneğinde hedefin sağlık ihtiyacı yerine maliyetle ilişkilendirilmesi, belirli gruplarda hizmete erişimin sistematik biçimde düşmesine yol açmıştır (Obermeyer ve arkadaşları, 2019). Bu nedenle amaç tanıımı, yalnızca teknik bir hedef değil, etik etkisi olan bir mühendislik kararıdır.

İkinci kontrol noktası veri seti ve değerlendirme tasarımıdır. Veri seti fişleri ve model kartları yaklaşımı, veri setinin ve modelin sınırlarının standart biçimde raporlanmasını hedeflemektedir (Gebru ve arkadaşları, 2018; Mitchell ve arkadaşları, 2019). Bu raporlar, alt grup performanslarını görünür kılar ve karar hattına denetim sinyali üretir. Adalet metrikleri, performans ölçümü ile birlikte ele alınmalıdır. Adaletin ölçümü yalnızca tek bir metriğe indirgenemez, ancak alt grup bazlı hata analizi ve eşik duyarlılığı raporları sistematik biçimde üretildiğinde riskler erken aşamada tespit edilebilir (Mehrabi ve arkadaşları, 2021; Hardt, Price, ve Srebro, 2016).

Üçüncü kontrol noktası karar hattı tasarımıdır. Model çıktısının doğrudan eyleme dönüşmesi yerine, belirsizlik düzeyi yükseldiğinde insan onayını zorunlu kılan bir akış kurulmalıdır. Ayrıca yerel açıklama yöntemleriyle, kararın hangi girdilerden etkilendiği raporlanmalı ve insan denetimi hedefli biçimde çalışmalıdır (Ribeiro, Singh, ve Guestrin, 2016; Lundberg ve Lee, 2017). Bu tasarım, vicdan denetim katmanının teknik omurgasını oluşturur.

Dördüncü kontrol noktası dağıtım sonrası izleme ve iyileştirmedir. Sistem davranışı sahada değiştiğinde risk göstergeleri yükselir. Bu nedenle izleme, yalnızca performans düşüşünü değil, önyargı sinyallerini, kullanım kaymasını ve güvenlik olaylarını birlikte izlemelidir. Risk yönetimi çerçeveleri, kurumların yönetim ve izleme adımlarını düzenli döngülerle işletmesini önermektedir (National Institute of Standards and Technology, 2023; National Institute of Standards and Technology, 2024). Bu döngü etik uyumu statik bir kontrol listesinden çıkarıp yaşayan bir süreç haline getirir.

Etik ilke setleri farklı kurumlarda değişse de küresel rehberlerin önemli bir bölümünün şeffaflık, adalet, zarar vermeme, sorumluluk ve mahremiyet ekseninde yakınsadığı gösterilmiştir (Jobin, Ienca, & Vayena, 2019). Bu bölümün temel sonucu ise vicdan kavramı, etik ilkelerin uygulanabilir mühendislik kontrol noktalarına dönüştürülmesidir. İlke kümelerini mühendisliğe bağlamak, bu ilkeleri soyut değerler değil kalite hedefleri ve kontrol ölçütleri olarak ele almayı gerektirir (Floridi & Cows, 2019). Amacın tanımı, veri seti ve değerlendirme tasarımı, karar hattı denetimi ve dağıtım sonrası izleme birlikte işletilmediğinde etik uyum iddiası sürdürülebilir olmaz.

8. Tartışma: Vicdan Denetim Katmanının Sınırları, Performans Maliyeti ve Kurumsal Uygulanabilirlik

Vicdan denetim katmanı, yapay zekâ sistemlerinde zarar olasılığını azaltmak ve güvenilirliği artırmak için güçlü bir mühendislik yaklaşımı sunmaktadır. Bununla birlikte bu yaklaşımın sınırları ve maliyetleri açık biçimde tartışılmadığında, tasarım kararları gerçekçi olmayan beklentiler üretebilmektedir. İlk sınır, belirsizliğin tamamen ortadan kaldırılamamasıdır. Model performansı artmış olsa bile veri dağılımının değişmesi, kullanıcı davranışının farklılaşması ve yeni kötüye kullanım yöntemlerinin ortaya çıkması, sahada yeni hata biçimleri oluşturabilmektedir. Dolayısıyla denetim katmanı hatayı tamamen sıfırlamaktan ziyade, etkisini sınırlama ve erken uyarı üretme hedefiyle tasarlanmalıdır. Risk yönetimi yaklaşımının temel mantığı, riskin tamamen yok edilmesinden çok kabul edilebilir seviyeye çekilmesidir (National Institute of Standards and Technology, 2023; International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission, 2023).

İkinci sınır performans maliyetidir. Denetim katmanı izleme, alt grup raporlama, belirsizlik tahmini ve kırmızı takım testleri gibi işlemler nedeniyle gecikme ve maliyet doğurur. Bu adımlar, gecikme süresini artırabilir ve kaynak tüketimini yükseltebilir. Büyük ölçekli üretken yapay zekâ sistemlerinde bu maliyet daha belirgindir. Ancak maliyet hesabı yapılırken yalnızca işlem süresi (latency) değil, hatalı kararın yaratacağı kurumsal ve hukuki yükler de dikkate alınmalıdır. Hatalı kararın kurumsal maliyeti, itibar kaybı, hukuki risk ve kullanıcı güveninin azalması ile ölçüldüğünde, denetim maliyetinin çoğu senaryoda daha rasyonel olduğu görülmektedir. Bu nedenle mühendislik yaklaşımı, maliyet ile risk azaltma etkisini birlikte değerlendirmelidir. Bu değerlendirme yapılmadığında güvenlik adımları ilk bütçe kısıtında devre dışı kalabilmekte, risk ise sahaya taşınmaktadır. Sorumlu yapay zekâ yönetişimi literatürü, yapısal, ilişkisel ve süreç temelli uygulamalar birlikte ele alınmadığında uyum ve güvenin sürdürülemediğini göstermektedir (Papagiannidis, Mikalef, & Conboy, 2025).

Üçüncü sınır ölçüm ve metrik seçimidir. Adalet, şeffaflık ve güvenilirlik ölçülebilir bileşenlere ayrıştırılmadığında denetim katmanı yalnızca rapor üreten bir katmana indirgenir. Adalet metrikleri tek bir sayı ile ifade edilemez, çünkü farklı metrikler farklı adalet tanımları içerir. Bahse konu gerekçelerle denetim katmanı, uygulama bağlamına uygun metrik seti ile çalışmalıdır. Aynı yaklaşım yanlış bilgi riski için de geçerlidir. Üretken sistemlerde doğruluk kontrolü, kaynağa erişim ve bağlam doğrulaması yapılmadığında sistemin ikna edici yanlış üretme kapasitesi devam eder (Weidinger ve arkadaşları, 2022). Ayrıca doğrulama katmanı kullanım senaryosuna göre seçilen doğrulama yöntemleriyle güçlendirilmelidir.

Dördüncü sınır kurumsal uygulanabilirliktir. Teknik araçların varlığı kurum süreçlerinin bunları işletmesini kendiliğinden sağlamaz. Veri seti belgeleri, model kartları ve risk raporları üretilse bile bu raporların karar süreçlerinde etkili olması için kurum içinde rol ve sorumlulukların netleşmesi gerekir. Etik yönetim, mühendislik ekipleri, ürün ekipleri ve yönetim arasında paylaşılan bir sorumluluktur. Literatürde etik ilkelerin uygulamaya dönüşmesinde yaşanan zorlukların önemli kısmı, araçların eksikliğinden çok kurumsal süreçlerin dağınıklığı ile ilişkilendirilmektedir (Huang, Zhang, Mao, ve Yao, 2023; Ismail ve Ahmad, 2025). Bu nedenle vicdan denetim katmanı, yalnızca teknik bir modül değil, süreç kanıtı üreten bir yönetim bileşeni olarak tasarlanmalıdır. Kamu yönetişiminde denetim kanıtı üretimi, raporlama kadar kurum içi sahiplik ve koordinasyon kapasitesi ile ilişkilidir, bu durum uluslararası ölçekte yönetim göstergelerine de yansımaktadır (Organisation for Economic Co-operation and Development, 2025). Kamu uygulamalarında benimseme dinamikleri, teknik

yeterlilik kadar kurumsal kapasite, reform kabiliyeti ve yönetim tasarımı ile birlikte ele alınmaktadır (Aarab, El Marzouki, Boubker, & El Moutaqi, 2025)

Bu tartışma vicdan kavramının mühendislikteki yerini daha netleştirmektedir. Amaç kararın her durumda doğru olması değil, karar hattında riskin görünür kılınması ve zarar olasılığının sistematik biçimde düşürülmesidir. Denetim katmanı performans maliyetine rağmen, hatanın maliyetinin yüksek olduğu alanlarda vazgeçilmez hale gelmektedir. Üretken yapay zekâ döneminde bu gereklilik yanlış bilgi ve kötüye kullanım riskleri nedeniyle daha da güçlenmektedir. Aşağıdaki Tablo 2’de özetlenen maliyet risk dengesi, denetim katmanının yalnızca teknik değil stratejik bir karar olduğunu göstermektedir.

Tablo 2. Denetim katmanı bileşenlerinin teknik tanımları, uygulamada getirdikleri maliyet türleri, sağladıkları risk azaltma etkileri ve önerilen kullanım bağlamları.

Denetim Katmanı Bileşeni	Getirdiği Maliyet Türleri (Teknik ve Operasyonel)	Sağladığı Risk Azaltma Etkisi	Önerilen Kullanım Bağlamları
1. Veri Seti Dokümantasyonu (Veri Fişleri)(Veri kaynağı, temsiliyet ve etiketleme süreci analizi)	Süreç ve Zaman Maliyeti: Veri toplama ve etiketleme süreçlerinin geriye dönük analizi ve standart raporlama için ek insan kaynağı ve zaman gerektirir.	Önyargı Görünürlüğü: Veri setindeki temsil dengesizliklerini, tarihsel kalıntıları ve olası ölçüm yanlışlıklarını model eğitimi öncesinde görünür kılar. Hatanın sahada ortaya çıkmasını engeller.	Tüm makine öğrenmesi geliştirme süreçleri özellikle insan üzerinde etkisi olan sosyal veri setleri.
2. Model Kartları ve Adalet Metrikleri(Alt grup performans analizleri ve sınır raporlama)	Hesaplama ve Analiz Maliyeti: Yalnızca genel doğruluk değil, farklı alt gruplar için ek testler, eşik duyarlılık analizleri ve kalibrasyon ölçümleri ek hesaplama yükü getirir.	Sistematik Ayrımcılık Tespiti: Modelin hangi demografik gruplarda hata oranının yükseldiğini gösterir. Yanlış pozitif/negatif kararların adaletsiz dağılımını engeller.	İşe alım, kredi skorlama, sağlık ve yüz tanıma gibi yüksek etkili karar destek sistemleri.
3. Belirsizlik ve Risk Eşiği Kontrolü(Tahmin güvenilirliği ölçümü ve otomatik durdurma)	İşlem Gecikmesi (Latency): Her tahmin için belirsizlik hesaplaması (örn. Monte Carlo yöntemleri) çıkarım süresini uzatır ve anlık yanıt gerektiren sistemlerde performans kaybı yaratır.	Hatalı Otonomi Engelleme: Modelin emin olmadığı durumlarda otomatik karar üretmesini engeller, yüksek riskli çıktıların doğrudan eyleme dönüşmesinin önüne geçer.	Hata maliyetinin yüksek olduğu güvenlik kritik sistemler ve otonom karar mekanizmaları.

4. Açıklanabilirlik ve İzlenebilirlik (XAI)(Yerel açıklama üretimi ve karar kaydı)	Hesaplama ve Depolama Maliyeti: Her bir karar için yerel açıklama üretmek işlem gücü gerektirir, tüm girdilerin, model sürümlerinin ve çıktıların loglanması yüksek depolama maliyeti yaratır.	Hesap Verebilirlik ve Denetim: Kararın hangi faktörlere dayandığını göstererek "kara kutu" problemini azaltır, olay sonrası kök neden analizine ve hukuki/kurumsal hesap verebilirliğe imkân tanır.	Denetime tabi sektörler ve insan denetiminin zorunlu olduğu karar akışları.
5. İnsan Denetimi (Human-in-the-Loop)(Zorunlu onay ve müdahale mekanizması)	Operasyonel Yüksek Maliyet: Karar sürecinin yavaşlaması, uzman personel ihtiyacı ve ölçeklenebilirlik sorunu yaratır. Genellikle ilk bütçe kısıtında vazgeçilen adımdır.	Nihai Güvenlik Katmanı: Teknik sistemlerin öngöremediği bağlamsal hataları yakalar, sorumluluk paylaşımını sağlar ve sistemin yetki devri düzeyini kontrol altında tutar.	Sağlık, kamu hizmetleri ve yargı gibi insan onurunu doğrudan etkileyen kritik alanlar.
6. Dağıtım Sonrası İzleme ve Olay Yönetimi(Drift takibi, güvenlik testleri ve sürüm kontrolü)	Sürekli Altyapı Maliyeti: Canlı sistemlerin sürekli izlenmesi, veri/kavram kayması analizleri ve kırmızı takım testleri (red teaming) sürekli kaynak ve bakım gerektirir.	Dinamik Risk Yönetimi: Kullanıcı davranışındaki değişimleri, kötüye kullanım girişimlerini ve dağılım kaymalarını tespit ederek modelin zamanla güvenilmez hale gelmesini önler.	Özellikle üretken yapay zekâ sistemleri olmak üzere, dış dünyaya açık tüm dinamik modeller.

9. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada insan makine etkileşimi ve yapay zekâda vicdan kavramı, etik bir ideal olarak değil, karar destek ve üretken yapay zekâ sistemlerinde zarar olasılığını azaltan mühendislik denetimi olarak ele alınmıştır. Yapay zekâ sistemlerinin karar üretiminde veri seti kaynaklı hatalar, algoritmik önyargı, hedef değişken tanımı ve dağıtım sonrası kullanım koşulları birlikte etkili olmaktadır. Bu bileşenlerin herhangi birinde oluşan zayıflık, sistemin sahada güven kaybına ve adaletsiz sonuçlara yol açmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle vicdan, sistemin çıktısının otomatik biçimde eyleme dönüşmesini engelleyen ve insan denetimini risk koşullarına göre devreye sokan bir denetim katmanı olarak tanımlanmıştır.

Vaka örnekleri üzerinden yapılan değerlendirme, riskin çoğu zaman teknik doğruluk sorunundan önce süreç tasarımı sorunu olduğunu göstermiştir. Hedef tanımı, veri seti temsiliyeti ve değerlendirme metriklerinin dar seçilmesi, sistemin

belirli gruplarda sistematik zarar üretmesine yol açabilmektedir. Üretken yapay zekâ sistemlerinde ise doğrulama ihtiyacı daha kritik hale gelmiş, ikna edici yanlış bilgi üretimi ve kötüye kullanım riskleri, güvenilirlik tartışmasını genişletmiştir. Bu nedenle vicdan denetim katmanı, adalet ve ayrımcılık boyutuna ek olarak doğruluk, kaynak izlenebilirliği, güvenlik testleri ve izleme pratikleri ile birlikte düşünülmelidir.

Mühendislik açısından uygulanabilir bir çözüm paketi önerilmiştir. Veri seti fişleri, model kartları, alt grup performans raporları, belirsizlik raporları, yerel açıklama çıktıları, kırmızı takım test raporları ve dağıtım sonrası olay günlüğü kayıtları birlikte üretildiğinde vicdan denetim katmanı somutlaşmaktadır. Bu çıktılar, etik ilkelerin uygulamaya dönüşmesini sağlayan kanıt setini oluşturmaktadır. Denetim yaklaşımının performans maliyeti bulunsa da hata maliyetinin yüksek olduğu karar alanlarında bu maliyet kabul edilebilir bir güvenlik yatırımı olarak değerlendirilmektedir.

Gelecek çalışmalar için üç yön öne çıkmaktadır. Birinci yön, belirsizlik ölçümü ve risk eşiklerinin uygulama alanına göre daha rafine biçimde tanımlanmasıdır. İkinci yön, üretken yapay zekâda doğrulama katmanlarının otomatikleştirilmesi ve kaynak izlenebilirliğinin güçlendirilmesidir. Üçüncü yön ise insan denetiminin yalnızca onay mekanizması olarak değil, geri bildirimle öğrenen ve hatayı azaltan bir kalite döngüsü olarak tasarlanmasıdır. Bu yönler geliştirildiğinde, vicdan kavramı yapay zekâ sistemlerinde soyut bir etik tartışma olmaktan çıkacak, güvenilirlik ve hesap verebilirlik üreten bir mühendislik standardına dönüşecektir.

KAYNAKÇA

- Aarab, A., El Marzouki, A., Boubker, O., & El Moutaqi, B. (2025). Integrating AI in public governance: A systematic review. *Digital*, 5(4), 59. <https://doi.org/10.3390/digital5040059>
- Amershi, S., Weld, D., Vorvoreanu, M., Fournery, A., Nushi, B., Collisson, P., Suh, J., Iqbal, S., Bennett, P. N., Inkpen, K., Teevan, J., Kikin-Gil, R., & Horvitz, E. (2019). Guidelines for human AI interaction. *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300233>
- Barocas, S., & Selbst, A. D. (2016). Big data's disparate impact. *California Law Review*, 104(3), 671–732.
- Bender, E. M., Gebru, T., McMillan-Major, A., & Shmitchell, S. (2021). On the dangers of stochastic parrots: Can language models be too big. *Proceedings of the 2021 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency*, 610–623. <https://doi.org/10.1145/3442188.3445922>
- Bertoncini, A. L. C., Pereira, A. L., Machado, L. T. S., & Lemos, R. (2023). Ethical content in artificial intelligence systems: A demand explained in three critical points. *Frontiers in Psychology*, 14, 1074787. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1074787>
- Bommasani, R., Hudson, D. A., Adeli, E., Altman, R., Arora, S., von Arx, S., ... Liang, P. (2021). On the opportunities and risks of foundation models. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2108.07258>
- Buolamwini, J., & Gebru, T. (2018). Gender shades: Intersectional accuracy disparities in commercial gender classification. *Proceedings of Machine Learning Research*, 81, 1–15.
- Dastin, J. (2018, October 10). Amazon scraps secret AI recruiting tool that showed bias against women. *Reuters*.
- European Union. (2024). Regulation (EU) 2024/1689 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 laying down harmonised rules on artificial intelligence (Artificial Intelligence Act). *Official Journal of the European Union*. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1689/oj/eng>
- Floridi, L., Cowls, J., Beltrametti, M., Chatila, R., Chazerand, P., Dignum, V., ... Vayena, E. (2018). AI4People An ethical framework for a good AI society: Opportunities, risks, principles, and recommendations. *Minds and Machines*, 28(4), 689–707. <https://doi.org/10.1007/s11023-018-9482-5>
- Gebru, T., Morgenstern, J., Vecchione, B., Vaughan, J. W., Wallach, H., Daumé III, H., & Crawford, K. (2018). Datasheets for datasets. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/1803.09010>

- Ghosh, M. (2025). Artificial intelligence (AI) and ethical concerns: A review and research agenda. *Cogent Business & Management*, 12(1). <https://doi.org/10.1080/23311975.2025.2551809>
- Hardt, M., Price, E., & Srebro, N. (2016). Equality of opportunity in supervised learning. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 29.
- Huang, X., Zhang, M., Mao, Y., & Yao, Z. (2023). From principles to practices: A systematic review of AI ethics and its practical implications. *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*, 4(1), 1–15. <https://doi.org/10.1109/TAI.2022.3194503>
- Hulok, M. (2025). The EU model of AI governance: Regulating artificial intelligence through law and policy. *ERA Forum*, 26, 527–547. <https://doi.org/10.1007/s12027-025-00869-1>
- International Organization for Standardization, & International Electrotechnical Commission. (2023). *ISO/IEC 23894:2023 Information technology: Artificial intelligence: Guidance on risk management*. ISO.
- International Telecommunication Union. (2025). *The Annual AI Governance Report 2025: Steering the Future of AI*. ITU. <https://www.itu.int/epublications/en/publication/the-annual-ai-governance-report-2025-steering-the-future-of-ai/en>
- Ismail, O., & Ahmad, N. (2025). Ethical and governance frameworks for artificial intelligence: A systematic literature review. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 19(14), 121–136.
- Jobin, A., Ienca, M., & Vayena, E. (2019). The global landscape of AI ethics guidelines. *Nature Machine Intelligence*, 1(9), 389–399. <https://doi.org/10.1038/s42256-019-0088-2>
- Kalodanis, K., Rizomiliotis, P., Feretzakis, G., Kalles, D., Verykios, V. S., & Anagnostopoulos, D. (2025). Enhancing transparency in large language models to meet EU AI Act requirements. In *Proceedings of the 28th Pan-Hellenic Conference on Informatics*, 281–286. <https://doi.org/10.1145/3716554.3716597>
- Lundberg, S. M., & Lee, S. I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30.
- Madanchian, M., & Rahim, N. A. (2025). Ethical theories, governance models, and strategic implementation for responsible AI integration. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 8. <https://doi.org/10.3389/frai.2025.1619029>
- Mehrabi, N., Morstatter, F., Saxena, N., Lerman, K., & Galstyan, A. (2021). A survey on bias and fairness in machine learning. *ACM Computing Surveys*, 54(6), 1–35. <https://doi.org/10.1145/3457607>

- Mitchell, M., Wu, S., Zaldivar, A., Barnes, P., Vasserman, L., Hutchinson, B., Spitzer, E., Raji, I. D., & Gebru, T. (2019). Model cards for model reporting. *Proceedings of the Conference on Fairness, Accountability, and Transparency*, 220–229. <https://doi.org/10.1145/3287560.3287596>
- National Institute of Standards and Technology. (2023). Artificial Intelligence Risk Management Framework (AI RMF 1.0) (NIST AI 100-1). <https://doi.org/10.6028/NIST.AI.100-1>
- National Institute of Standards and Technology. (2024). Artificial Intelligence Risk Management Framework: Generative AI Profile (NIST AI 600-1). NIST.
- Obermeyer, Z., Powers, B., Vogeli, C., & Mullainathan, S. (2019). Dissecting racial bias in an algorithm used to manage the health of populations. *Science*, 366(6464), 447–453. <https://doi.org/10.1126/science.aax2342>
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2019). Recommendation of the Council on Artificial Intelligence. OECD Legal Instruments. <https://legalinstruments.oecd.org/en/instruments/oecd-legal-0449>
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2022). OECD framework for the classification of AI systems (OECD Digital Economy Papers No. 323). OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/cb6d9eca-en>
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2025). Governing with artificial intelligence. In *Government at a Glance 2025*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/0efd0bcd-en>
- Ortega-Bolaños, R., Bernal-Salcedo, J., Germán Ortiz, M., Galeano Sarmiento, J., Ruz, G. A., & Tabares-Soto, R. (2024). Applying the ethics of AI: A systematic review of tools for developing and assessing AI-based systems. *Artificial Intelligence Review*, 57, Article 110. <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10740-3>
- Papagiannidis, E., Mikalef, P., & Conboy, K. (2025). Responsible artificial intelligence governance: A review and research framework. *The Journal of Strategic Information Systems*, 34(2), Article 101885. <https://doi.org/10.1016/j.jsis.2024.101885>
- Ribeiro, M. T., Singh, S., & Guestrin, C. (2016). “Why should I trust you”: Explaining the predictions of any classifier. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 1135–1144. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939778>
- UNESCO. (2021). Recommendation on the ethics of artificial intelligence. UNESCO.
- Weidinger, L., Uesato, J., Rauh, M., Griffin, C., Mellor, J., Huang, P. S., Cheng, M., Glaese, A., Balle, B., Kasirzadeh, A., & Gabriel, I. (2022). Taxonomy of risks posed by language models. *Proceedings of the 2022 ACM Conference*

on Fairness, Accountability, and Transparency, 214–229.
<https://doi.org/10.1145/3531146.3533088>

World Economic Forum. (2025). The Global Risks Report 2025 (20th ed.). World Economic Forum.
https://reports.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_Report_2025.pdf

BÖLÜM 37

Büyük Çapta Kompleks Geometrilili, Yekpare Kilitleme Mekanizmalı ve Hassas Toleranslı Fren Piston İç-Dış Sızdırmazlık Kiti Tasarım ve Prototip Üretimi

**Nurettin Baran Revan¹ & Meliha Naz Ediz² &
Tolga Umutlu³ & Çağlar Tuncel⁴ & Erva Nur Poyraz⁵
& Ezgi Özgünerge Falay⁶ & Öz Erman Arusan⁷ &
Engin Tan⁸ & İsmail Ovalı⁹**

¹ ARNES Mekanik Makine San. Tic. Ltd. Şti. Tasarım Merkezi
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6316-3570>

² ARNES Mekanik Makine San. Tic. Ltd. Şti. Tasarım Merkezi
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6215-688X>

³ ARNES Mekanik Makine San. Tic. Ltd. Şti. Tasarım Merkezi
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0852-3801>

⁴ ARNES Mekanik Makine San. Tic. Ltd. Şti. Tasarım Merkezi
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0761-7102>

⁵ ARNES Mekanik Makine San. Tic. Ltd. Şti. Tasarım Merkezi
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3931-5778>

⁶ ARNES Mekanik Makine San. Tic. Ltd. Şti. Tasarım Merkezi
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6264-2795>

⁷ ARNES Mekanik Makine San. Tic. Ltd. Şti. Tasarım Merkezi
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6312-8533>

⁸ Pamukkale Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü
ORCID: 0000-0003-4441-3678

⁹ Pamukkale Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü
ORCID: 0000-0002-8193-0060

1. GİRİŞ

Son yıllarda otomotiv ve hidrolik sistemlerde kullanılan fren mekanizmalarının performans gereksinimleri giderek artmakta; özellikle yüksek basınç, dar tolerans ve uzun ömür kriterleri, sızdırmazlık elemanlarının tasarımında kritik rol oynamaktadır. Sızdırmazlık bileşenlerinin görevini doğru ve güvenilir şekilde yerine getirmesi, sistem genelinde güvenlik, enerji verimliliği ve bakım maliyetleri açısından belirleyici olmaktadır. Bu kapsamda geliştirilen her yeni tasarım, yalnızca fonksiyonel bir iyileştirme değil, aynı zamanda üretim teknolojileri, işlenebilirlik ve kalite standartları açısından da yenilikçi yaklaşımlar gerektirmektedir.

Bu çalışma, ARNES Mekanik Makine bünyesinde yürütülen, büyük çapta, kompleks geometrili, yekpare kilitleme mekanizmasına sahip fren piston iç-dış sızdırmazlık kitinin tasarım, analiz, prototip üretimi ve işlenebilirlik optimizasyonu süreçlerini kapsamaktadır. Söz konusu çalışma, geleneksel çok parçalı sızdırmazlık sistemlerinde karşılaşılan montaj zorluklarını ve tolerans kaynaklı sızıntı problemlerini ortadan kaldırmayı hedeflemektedir. Ayrıca, yekpare yapı sayesinde daha kompakt, dayanımı yüksek ve üretim açısından daha verimli bir çözüm sunulmuştur.

Çalışma kapsamında, prototip tasarım aşamasında topoloji optimizasyonu ve FEM analizleri kullanılarak malzeme dağılımı ve mekanik dayanım optimize edilmiş, montaj çakışma analizleri ile sistem bileşenleri arasında tam uyum sağlanmıştır. Üretim aşamasında ise tolerans değeri 0,15 mm'den 0,08 mm ($\pm 0,04$) seviyesine düşürülerek yüksek hassasiyet elde edilmiştir. Üretim çevrim süresinin 180 saniyeden 55 saniyenin altına indirilmesi, üretim hattında önemli bir verimlilik artışı sağlamıştır.

Prototipler üzerinde gerçekleştirilen aşınma testleri ve SEM/EDS yüzey analizleri, ürünün ömrünün ve performansının doğrulanmasını sağlamıştır. Ayrıca, kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, dairesellik ve silindiriklik gibi işlenebilirlik parametreleri analiz edilerek optimize edilmiş bir ürün üretim reçetesi oluşturulmuştur.

Bu çalışma, yüksek hassasiyet, düşük tolerans, uzun ömür ve güvenilirlik gereksinimlerine yönelik yenilikçi bir mühendislik yaklaşımı sunmakta, fren sistemleri ve hidrolik ekipman endüstrisinde verimlilik, kalite ve rekabet gücünü artırmaya katkı sağlamaktadır. Elde edilen sonuçlar, kompleks geometriye sahip sızdırmazlık elemanlarının talaşlı imalat yöntemiyle doğrudan CNC

tezgâhlarında, ek işlem gerektirmeden üretilebileceğini göstermiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Sızdırmazlık Elemanları ve Kullanım Alanları

Sızdırmazlık elemanları, iki yüzey arasında akışkan kaçaklarını engellemek veya kabul edilebilir sınırlar içinde kontrol altında tutmak için tasarlanmış makine bileşenleridir. Sızdırmazlık elemanları, hidrolik ve mekanik sistemlerde akışkan kontrolünü sağlamak, basınçlı bölge ile dış ortam arasında kaçakları önlemek ve sistem performansını arttırmak için kullanılan kritik mühendislik bileşenleridir. Ayrıca bu elemanlar, enerji verimliliğini yükseltme, servis ömrünü uzatma ve çevresel riskleri azaltma açısından da sistem tasarımında kritik bir konumda yer alır (Stachowiak & Batchelor, 2014).

Fren sistemleri gibi güvenlik açısından kritik uygulamalarda, sızdırmazlık elemanlarının geometrik hassasiyeti, yüzey karakterizasyonu, malzeme performansı ve tribolojik davranışı doğrudan sistem güvenilirliğini belirler.

Endüstride mutlak sıfır kaçak hedefi pratikte mümkün değildir; bunun yerine toleranslar dahilinde sızdırmazlığın sağlanması amaçlanır (ISO 3601, 2012). Sızdırmazlık elemanının işlevi yalnızca akışkanı tutmak değildir; aynı zamanda sürtünmeyi minimize etmek, yüzey aşınmasını kontrol etmek ve sistem dayanıklılığını optimize etmektir (Salant, 2012).

Sızdırmazlık elemanları, çalışma koşulları, temas biçimi ve kullanılan malzeme türüne bağlı olarak farklı kategorilerde sınıflandırılabilir. Genel olarak bu sınıflandırma **statik–dinamik**, **temaslı–temassız** ve **malzeme odaklı** olmak üzere üç temel başlık altında incelenmektedir.

2.1.1. Statik - Dinamik Sızdırmazlık

Statik sızdırmazlık, birbirine göre hareketsiz yüzeyler arasında gerçekleşen sızdırmazlık tipidir. Bu tür uygulamalarda yüzey contaları, flanş bağlantıları veya sabit kapak sızdırmazlıkları örnek olarak verilebilir. Dinamik sızdırmazlık ise birbirine göre hareket eden yüzeyler arasında görev yapar. Piston keçeleri, mil keçeleri veya hidrolik silindirlerdeki boğaz contaları bu kategoriye girer. Dinamik sızdırmazlıkta, hareketli temas yüzeyleri nedeniyle sürtünme, aşınma ve ısı oluşumu önemli tasarım kriterleridir.

2.1.2. Temaslı - Temassız Sızdırmazlık

Temaslı sızdırmazlık sistemlerinde, sızdırmazlık elemanı doğrudan temas yüzeyiyle sürekli temas halindedir. Bu tip tasarımlar düşük sızıntı oranı sağlarken, yüksek sürtünme kuvvetleri ve aşınma riski barındırır. Buna karşın temassız sızdırmazlık sistemlerinde, yüzeyler arasında mikron mertebesinde

boşluklar bulunur. Bu sayede sürtünme kuvveti azalırken, belirli bir seviyede kontrollü sızıntıya izin verilir. Temassız sistemler genellikle yüksek hız ve düşük sürtünme gerektiren uygulamalarda tercih edilir.

2.1.3. Malzeme Odaklı Sınıflandırma

Sızdırmazlık elemanları, kullanılan malzeme türüne göre de sınıflandırılabilir. **Elastomer** esaslı malzemeler (örneğin NBR, FKM ve PU), yüksek esneklikleri ve kimyasal dirençleri sayesinde hem statik hem dinamik uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. **Termoplastikler**, özellikle **PTFE (politetrafloroetilen)** gibi malzemeler, düşük sürtünme katsayısı, yüksek sıcaklık dayanımı ve kimyasal inertlik özellikleriyle ön plana çıkar. **Metalik bileşenler** ise genellikle yüksek basınç veya sıcaklık altında görev yapan, mekanik dayanımın öncelikli olduğu sızdırmazlık sistemlerinde tercih edilir.

Sonuç olarak, bir sızdırmazlık elemanının tasarımı ve seçimi, sistemin çalışma koşullarına, temas tipine, malzemenin mekanik ve tribolojik özelliklerine bağlı olarak yapılır. Bu sınıflandırma, doğru malzeme ve tasarım kombinasyonunun seçilmesinde kritik bir mühendislik rehberi niteliğindedir (Stachowiak & Batchelor, 2014; Etsion, 2010; Biresaw & Mittal, 2014).

2.2. Sızdırmazlık Elemanlarının Endüstrideki Önemi

Sızdırmazlık sistemleri, yalnızca akışkan kayıplarını önlemekle kalmayıp, aynı zamanda enerji verimliliği, sistem güvenilirliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından endüstriyel süreçlerde kritik bir rol üstlenmektedir.

Enerji verimliliğinin artırılması, sızdırmazlık elemanlarının en temel işlevlerinden biridir. Hidrolik ve pnömatik sistemlerde meydana gelen basınç kayıpları, doğrudan enerji israfına yol açar. Bu kayıpların etkin sızdırmazlık tasarımlarıyla sınırlandırılması, sistemin çalışma verimini yükseltir ve enerji tüketimini azaltır. Ivantysyn & Ivantysynova (2001) tarafından yapılan çalışmalar, iyi tasarlanmış bir sızdırmazlık sisteminin basınç düşüşlerini minimize ederek hidrolik verimliliği önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Özellikle yüksek basınç altında çalışan sistemlerde, uygun sızdırmazlık geometrisi ve malzeme seçimiyle enerji kayıplarının azaltılması, işletme maliyetlerinin düşürülmesinde de doğrudan etkili olmaktadır.

Bir diğer önemli katkı, sistem güvenilirliğinin artırılmasıdır. Kaçakların kontrol altına alınması, yalnızca akışkan kaybını önlemekle kalmaz; aynı zamanda ekipmanların aşınmasını, sıcaklık artışlarını ve plansız duruşları da azaltır. Bu sayede sistemin çalışma ömrü uzar ve bakım sıklığı azalır. Bloch & Geitner (2006) sızdırmazlık performansının, özellikle döner ekipmanlarda ve yüksek basınçlı uygulamalarda, arıza oranlarını belirleyen en kritik faktörlerden

biri olduğunu vurgulamıştır. Etkin sızdırmazlık, sistem kararlılığını artırırken, operasyonel güvenliği de güçlendirir.

Son olarak, çevresel etkilerin azaltılması açısından sızdırmazlık sistemleri büyük önem taşır. Kaçaklar sonucu açığa çıkan akışkanlar, hem çevresel kirliliğe hem de kaynak israfına neden olur. Bu durum özellikle petrol, hidrolik yağ veya kimyasal akışkan kullanılan sistemlerde çevreye zarar verebilir. Jagger (2013), endüstriyel tesislerde meydana gelen akışkan kaçaklarının çevresel etkilerini incelemiş ve sızdırmazlık optimizasyonunun karbon ayak izinin azaltılmasında doğrudan etkili olduğunu ortaya koymuştur. Bu nedenle modern mühendislik yaklaşımları, yalnızca performansa değil, çevresel sürdürülebilirliğe de katkı sağlayan sızdırmazlık çözümlerinin geliştirilmesini hedeflemektedir.

Sonuç olarak, uygun tasarlanmış ve doğru malzeme seçimine dayanan sızdırmazlık sistemleri; enerji tasarrufu, güvenilir operasyon ve çevre dostu üretim hedeflerinin eş zamanlı olarak sağlanmasına imkân tanıyan temel mühendislik unsurlarıdır.

2.3. Boğaz Keçesinin Özellikleri

Boğaz keçesi, hidrolik sistemlerde piston kolu ile silindir kapağı arasında konumlanan ve basınçlı akışkanın dış ortama kaçmasını önleyen dinamik bir sızdırmazlık elemanıdır (Salant, 2012). Bu eleman, ileri–geri hareket altında çalıştığı için statik sızdırmazlık elemanlarından farklı olarak değişken hız, basınç ve sıcaklık koşullarına eş zamanlı uyum göstermek zorundadır. Boğaz keçesinin temel özelliği, hareket sırasında sızdırmazlık performansını kaybetmeden piston kolu üzerinde kararlı bir temas basıncı oluşturabilmesidir (Stachowiak & Batchelor, 2014).

Boğaz keçeleri genellikle basınç destekli çalışır ve sistem basıncı arttıkça keçe dudağı piston koluna daha kuvvetli bastırılır. Bu mekanizma, yüksek basınç altında sızdırmazlığın artmasını sağlarken temas basıncının aşırı yükselmesi durumunda sürtünme ve aşınma riskini de beraberinde getirir. Bu nedenle keçe geometrisi ve malzeme özelliklerinin dikkatle tasarlanması gerekir (Hamrock, Schmid & Jacobson, 2004). Boğaz keçesinin bir diğer kritik özelliği, düşük hızlarda dahi tutma-kayma (stick–slip) davranışını minimize ederek titreşimsiz ve düzgün bir hareket sağlamasıdır; bu durum özellikle servo hidrolik sistemler ve fren uygulamaları için hayati önem taşır (Salant, 2012).

Boğaz keçesi, piston kolu üzerinde mikroskobik bir yağ filmi bırakacak şekilde tasarlanmalıdır. Bu yağ filmi sürtünmeyi azaltır, temas sıcaklığını düşürür ve aşınmayı sınırlar. Yağ filminin fazla kalın olması kaçak riskini artırırken, aşırı ince olması sınır yağlama koşullarına girilmesine ve hızlı aşınmaya neden olur. Bu hassas denge, boğaz keçesini hidrolik sistemlerin en kritik sızdırmazlık

elemanlarından biri hâline getirmektedir (Hamrock et al., 2004; Stachowiak & Batchelor, 2014). Teflon (PTFE) esaslı boğaz keçeleri, düşük sürtünme katsayıları ve kimyasal kararlılıkları sayesinde bu dengiyi sağlamakta avantaj sunar; ancak düşük elastik geri dönüş özellikleri nedeniyle çoğunlukla yay ve O-ring destekli olarak kullanılırlar (Biresaw & Mittal, 2014).

Boğaz keçesinin önemli bir sınırı, yan yük taşıma kabiliyetinin bulunmamasıdır. Piston kolu üzerinde oluşan eğilme momentleri ve eksen kaçıklıkları doğrudan boğaz keçesine iletildiğinde, dudak deformasyonu, düzensiz aşınma ve erken kaçak oluşumu kaçınılmaz hâle gelir (Bloch & Geitner, 2006). Bu nedenle boğaz keçesi, mekanik yük taşıyan bir eleman olarak değil, yalnızca sızdırmazlık fonksiyonunu yerine getiren hassas bir bileşen olarak değerlendirilmelidir.

2.4. Yataklama Elemanının Özellikleri

Yataklama elemanı ise hidrolik sistemin mekanik stabilitesini sağlayan ve hareketli parçalar üzerinde oluşan yan yükleri karşılayan bir kılavuz elemandır. Yataklama elemanları, piston veya piston kolunun silindir içinde eksenel doğrultuda düzgün hareket etmesini sağlayarak yalpalamayı ve titreşimi sınırlar (ISO 5597, 2019). Bu elemanların temel özelliği, metal-metal temasını önleyerek pahalı ve hassas yüzeylerin aşınmasını engellemesidir. Yataklama elemanları bilinçli olarak aşınacak şekilde tasarlanır ve bu sayede sistemdeki yüklerin büyük kısmını üzerine alarak sızdırmazlık elemanlarının mekanik yüklerden izole edilmesini sağlar (Bloch & Geitner, 2006).

Yataklama elemanları genellikle cam elyaf veya bronz takviyeli PTFE, POM ve benzeri kompozit malzemelerden üretilir. Bu malzemeler yüksek basınç altında şekil kararlılığı, düşük sürtünme ve iyi aşınma direnci sunarak ağır hizmet sektöründeki hidrolik uygulamalarında güvenilir performans sağlar (Biresaw & Mittal, 2014). Boğaz keçesi ve yataklama elemanının birlikte kullanılması, hidrolik sistemlerde fonksiyonların doğru şekilde ayrılmasını sağlar. Yataklama elemanı yan yükleri ve hizalama görevini üstlenirken, boğaz keçesi yalnızca sızdırmazlık performansına odaklanır. Bu yapı, sürtünmenin kararlı hâle gelmesini, aşınmanın kontrol altına alınmasını ve yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda sistem güvenilirliğinin artmasını sağlar (Salant, 2012; Stachowiak & Batchelor, 2014).

3. MATERYAL & METOD

3.1. Tasarım Çalışmaları

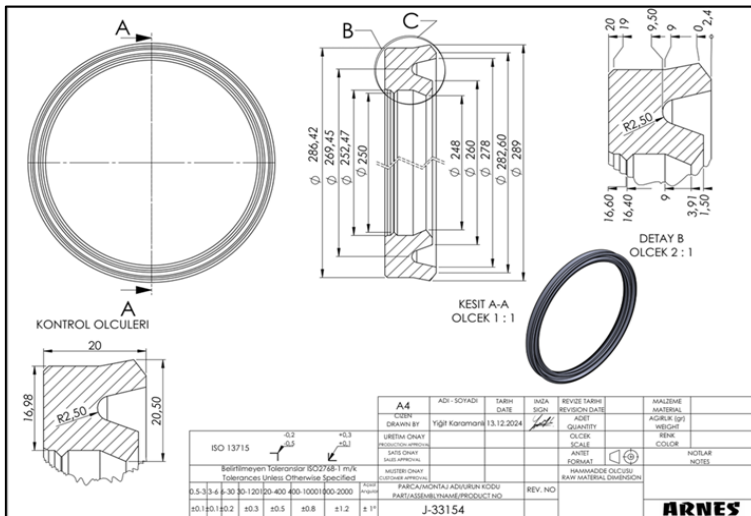
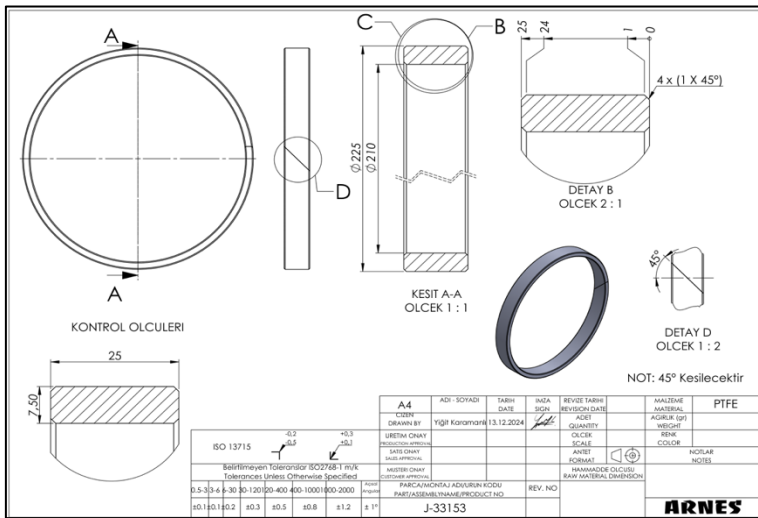
3.1.1. Prototip Tasarım

Çalışmada geliştirilen fren piston iç-dış sızdırmazlık elemanı kiti, yüksek basınç altında çalışan, kompleks geometrili ve yekpare kilitleme mekanizmalı bir yapıya sahiptir. Bu nedenle, tasarım süreci çok aşamalı bir mühendislik yaklaşımıyla ele alınmıştır. Süreç, proje başlangıcından nihai prototip üretimine kadar olan tüm teknik faaliyetleri sistematik biçimde içermektedir. Çalışma, prototip tasarım, topoloji optimizasyonu, sonlu elemanlar analizi (FEM), montaj çakışma analizleri, prototip üretim ve işlenebilirlik testleri olmak üzere altı ana aşamadan oluşmaktadır.

İlk aşamada, mevcut fren piston sistemleri incelenmiş ve bu sistemlerdeki sızdırmazlık elemanlarının montaj zorlukları, üretim hataları ve tolerans kaynaklı kaçak problemleri analiz edilmiştir. Bu incelemeler sonucunda, tek parça halinde üretilen ve montaj sırasında kendi kendine kilitleme özelliğine sahip bir yekpare sızdırmazlık elemanı kiti konsepti geliştirilmiştir. CAD ortamında oluşturulan ön tasarımda, kilitleme geometrisinin yerleşimi, kanal genişlikleri ve temas bölgeleri detaylı olarak modellenmiştir.

3.1.2. Prototip Ürün

Bu çalışma kapsamında sızdırmazlık elemanlarından biri olan boğaz keçesi kullanılmıştır. Boğaz keçeleri uygulamalarında yataklama elemanı ile birlikte kullanılmaktadır. Yataklama elemanı ile oluşturulan sızdırmazlık kitinde boğaz keçesi sistemin sızdırmazlığını sağlarken, yataklama elemanı sisteme gelen yan yükleri emerek piston kolunun eksende hareket etmesini sağlamaktadır. Ayrıca metal-metal temasını önleyerek boğaz keçesinin yükünü izole etmektedir. Çalışmada kullanılan yataklama elemanı ve boğaz keçesi prototip tasarımına ait teknik resimler Şekil 1 ve Şekil 2’de gösterilmiştir.



tamamlanmıştır. Optimizasyon sonucunda malzeme dağılımı iyileştirilmiş, ağırlık azaltımı sağlanırken mukavemet değerleri korunmuştur.

3.1.4. Sonlu Elemanlar Analizi (FEM)

Ürünün çalışma koşulları altında davranışını değerlendirmek amacıyla statik ve termal sonlu elemanlar (FEM) analizleri uygulanmıştır. Analizlerde, piston yüzeyine uygulanan basınç ve sıcaklık dağılımları altında deformasyon, gerilme ve temas bölgeleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, sızdırmazlık yüzeyinde homojen bir basınç dağılımı sağlandığını, kritik bölgelerdeki gerilme yoğunluklarının belirlenerek geometrik iyileştirmeler yapıldığını ve elastomerik deformasyonun istenilen aralıkta gerçekleştiğini göstermiştir. Böylece, tasarım doğrulama süreci sonunda ürünün mekanik dayanımı ve yapısal kararlılığı artırılmıştır.

3.1.5. Montaj ve Çakışma Analizi

Prototip tasarımın üretime ve montaja uygunluğu, çakışma (interference) analizleri ile değerlendirilmiştir. Bu aşamada, kilitleme mekanizmasının montaj esnasında oluşturduğu elastik deformasyon oranı analiz edilmiş; temas bölgelerinde malzeme gerilimi kontrol edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre tasarımda hiçbir geometrik çakışma tespit edilmemiş, montaj toleransları optimize edilmiştir.

3.2. Prototip Üretim

Analizlerle doğrulanan tasarım modeli, talaşlı imalat yöntemiyle CNC tezgahında prototip olarak üretilmiştir. İlk prototip üretimi CNC tezgâhlarında gerçekleştirilmiş, üretim sırasında masterla üretim sistemi oluşturularak boyutsal tekrarlanabilirlik sağlanmıştır. Üretim süreci analiz edilerek çevrim süresi ve tolerans kararlılığı açısından optimizasyon yapılmıştır. Üretim sürecinde, 0,15 mm olan standart tolerans aralığı 0,08 mm ($\pm 0,04$) seviyesine düşürülerek yüksek hassasiyetli bir üretim gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çevrim süresi 180 saniyeden 55 saniyenin altına indirilmiş ve ek işlem gerektirmeden doğrudan işleme yapılmıştır.

3.2.1. İşlenebilirlik Testleri ve Yüzey Analizi

Prototip parçalar üzerinde gerçekleştirilen işlenebilirlik testlerinde; kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü (Ra), dairesellik, silindiriklik ve takım aşınması gibi parametreler incelenmiştir. Bu testler sonucunda, optimum kesme hızı ve ilerleme değerleri belirlenmiş; elde edilen yüzey kalitesi, sızdırmazlık performansını destekleyecek düzeye ulaşmıştır.

Ayrıca, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılımlı

Spektroskopi (EDS) analizleriyle yüzey morfolojisi ve malzeme bileşimi incelenmiş; yüzey deformasyonlarının ve olası mikro çatlakların önüne geçilmiştir.

3.2.2. Prototip Tasarımın Doğrulanması

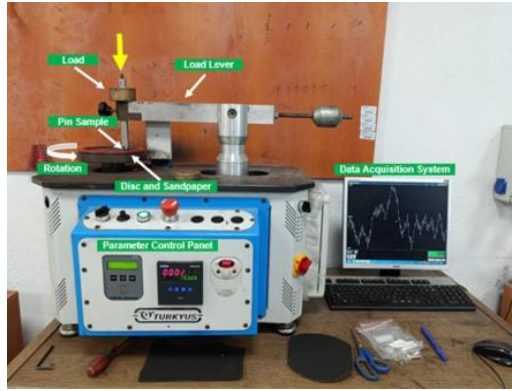
Yapılan tüm testler ve analizler sonucunda, ürünün nihai geometrisi kesinleştirilmiş, kilitleme mekanizması doğrulama testlerinden başarıyla geçmiştir. Üretim tekrarlanabilirliği sağlanarak $\pm 0,04$ mm hassasiyet seviyesinde tolerans kararlılığı elde edilmiştir.

3.2.3. Kalite Kontrol Ölçümleri

Üretilen prototip parçaların kalite kontrol işlemleri malzemenin ortam koşullarından etkilenme ihtimalini önlemek için iklimlendirilmiş ortam koşullarında yürütülmüştür. Bu sayede çevresel değişkenlerin üretim hassasiyeti üzerindeki etkisi minimize edilmiştir.

3.3. Aşınma Test Çalışmaları

Aşınma testleri, Ø10 x 30 mm boyutlarında hazırlanan PTFE numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Testler, ASTM G99 standardına uygun olarak pin-on-disc (disk üzerine pim) tipi aşınma test cihazında yürütülmüştür. Çalışmada kullanılan aşınma test cihazı Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Aşınma test cihazı

Deneyler ortam sıcaklığında ve yağlayıcı kullanılmadan yapılmıştır. Aşındırıcı yüzey olarak 600 mesh SiC (silisyum karbür) zımpara kâğıdı kullanılmıştır. Testler iki farklı kayma hızı olan 3 m/s ve 4,5 m/s, dört farklı uygulama yükü olan 5 N, 10 N, 15 N ve 40 N, ve üç farklı kayma mesafesi olan 100 m, 200 m ve 300 m değerlerinde gerçekleştirilmiştir.

Her deney öncesinde numunelerin ağırlıkları hassas terazide ölçülerek başlangıç değerleri kaydedilmiş; testlerin tamamlanmasının ardından aynı yöntemle son ağırlık değerleri belirlenmiştir. Bu ölçümler sonucunda elde edilen ağırlık kaybı verilerinden yararlanılarak gram kaybı ve hacim kaybı değerleri hesaplanmıştır.

Elde edilen veriler, kayma mesafesi ile gram/hacim kaybı arasındaki ilişkiyi gösterecek şekilde grafiklere dönüştürülmüştür. Ayrıca test sırasında cihazın yük hücresi (load cell) tarafından ölçülen veriler kullanılarak sürtünme katsayısının değişimi zamana bağlı olarak analiz edilmiştir.

Bu grafikler, PTFE malzemenin aşınma davranışını ve sürtünme karakteristiklerini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Deneysel verilerden hacimsel aşınma oranı ve sürtünme katsayısı değerleri, ASTM G99 standardında belirtilen hesaplama yöntemlerine göre elde edilmiştir. Hesaplama yöntemi aşağıda belirtilmiştir.

$$\text{Hacim kaybı (mm}^3\text{)} = [\text{Ağırlık kaybı (g) / Yoğunluk (g/cm}^3\text{)}] \times 1000 \quad (1)$$

$$\text{Sürtünme katsayısı } (\mu) = F / P \quad (2)$$

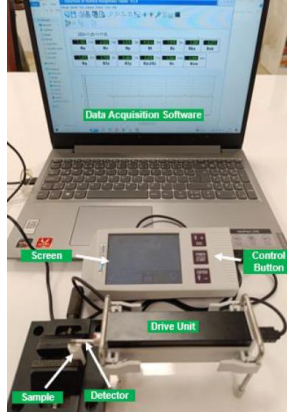
Burada,

F: Sürtünme kuvveti (N),

P: Uygulanan dikey yük (N) olarak tanımlanmıştır.

Test sırasında, cihazdaki yük hücresi tarafından ölçülen sürtünme kuvveti F, numune yüzeyi ile karşı yüzey arasındaki sürtünme etkisini temsil etmektedir. Uygulanan normal yük P ise test esnasında numuneye uygulanan düşey kuvveti ifade etmektedir.

Aşınma testlerinden sonra, 40 N yük altında ve 300 m kayma mesafesiyle test edilen numune üzerinde yüzey pürüzlülüğü ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı

Aşınma testleri sonrasında numune yüzeyinde oluşan aşınma izleri, Şekil 5’te verilen ZEISS SUPRA 40VP model taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir.



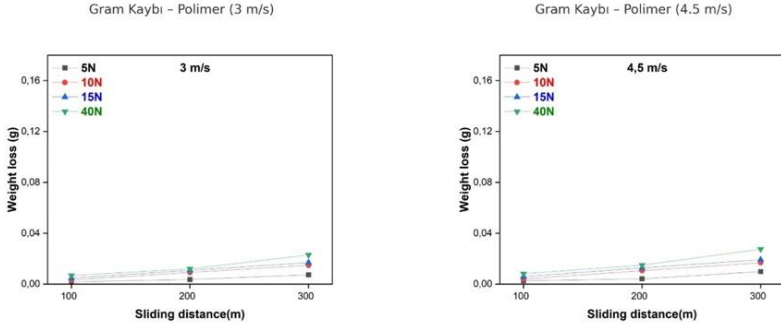
Şekil 5. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) cihazı

4. SONUÇLAR

4.1. Aşınma Test Sonuçları

4.1.1. Kütlesel Kayıplar

Teflon malzemesine 3 m/s ve 4.5 m/s hızda uygulanan aşınma testine ait kütle kaybı aşınma grafikleri Şekil 6’da gösterilmiştir. Grafikler, uygulanan yük (5N, 10N, 15N, 40N) ve kayma mesafesi (100–200–300 m) boyunca oluşan kütle kaybı (aşınmayı) göstermektedir.



Şekil 6. 3 m/s ve 4.5 m/s hızda uygulanan aşınma testine ait kütle kayıpları

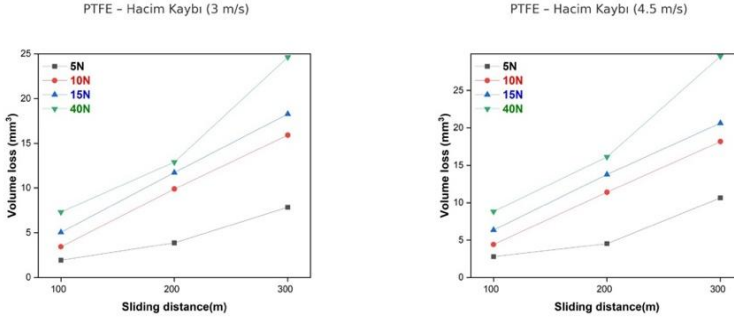
Her iki hızda da kütle kaybı, uygulanan yük (5N → 40N) ve kayma mesafesi (100m → 300m) ile birlikte artış göstermektedir.

- **3 m/s hızda:** Kütle kayıpları daha düşük seviyelerde kalmıştır. Özellikle 5N ve 10N yüklerde neredeyse sabit ve çok düşük seviyede seyretmektedir.
- **4.5 m/s hızda:** Kütle kaybı değerleri daha yüksektir. Bu durum, artan hızın sürtünme etkisini artırarak malzeme yüzeyinde daha fazla yıpranmaya yol açtığını göstermektedir.

Sonuçlar incelendiğinde en yüksek kütle kaybının, 4.5 m/s hızda 40N yük altında ve 3000 m kayma mesafesinde gerçekleştiği görülmüştür. Bu nokta, her iki hız değeri için de eğrinin en dik olduğu bölgedir. PTFE malzeme, düşük hız (3 m/s) ve düşük yük ($\leq 10N$) koşullarında oldukça iyi aşınma dayanımı sergilemiştir. Bu durum, çalışma kapsamında hedeflenen yüksek hassasiyetli, düşük toleranslı parçaların güvenli şekilde üretilebileceğini göstermektedir. Ancak hız ve yük birlikte arttığında (özellikle 4,5 m/s – 40N), gram kaybındaki belirgin artış malzemenin sınır dayanımını zorladığını işaret etmektedir. Bu nedenle bu tür uygulamalarda yük ve hız optimizasyonunun dikkatle planlanması gerekmektedir.

4.1.2. Hacimsel Kayıplar

Teflon malzemesine 3 m/s ve 4.5 m/s hızda uygulanan aşınma testine ait hacimsel kayıp aşınma grafikleri Şekil 7’de gösterilmiştir. Grafikler, uygulanan yük (5N, 10N, 15N, 40N) ve kayma mesafesi (100–200–300 m) boyunca oluşan hacim kaybını (aşınmayı) göstermektedir.



Şekil 7. 3 m/s ve 4.5 m/s hızda uygulanan aşınma testine ait hacimsel kayıplar

Her iki hızda da hacim kaybı, hem yük arttıkça hem de kayma mesafesi uzadıkça düzenli olarak artmaktadır.

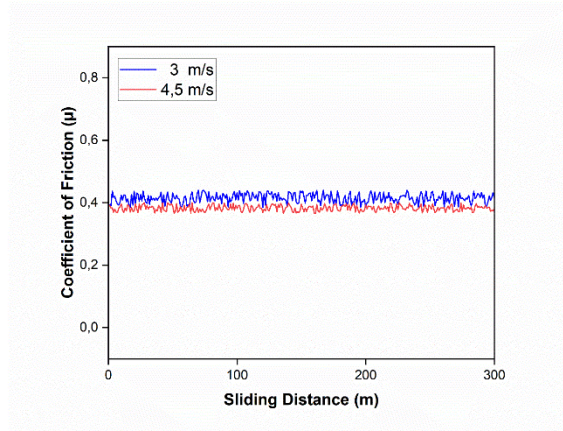
- **3 m/s hızda**, hacim kaybı daha kontrollü ve nispeten düşük seviyelerde kalmıştır. Bu durum, PTFE'nin düşük hızlarda daha stabil aşınma direnci sunduğunu göstermektedir.
- **4.5 m/s hızda**, özellikle 15N ve 40N yüklerde hacim kaybında belirgin bir artış gözlemlenmektedir. Bu, artan hızla birlikte sürtünmeden kaynaklı ısı etkisinin hacimsel yıpranmayı hızlandığını işaret eder.

Sonuçlar incelendiğinde, en fazla hacim kaybının, 4,5 m/s hızda 40N yük altında 3000 m kayma mesafesinde gerçekleştiği görülmüştür. Bu nokta, PTFE'nin sınır dayanımına ulaştığını göstermektedir. PTFE, düşük ve orta hızlarda (3 m/s) yüksek aşınma direnci gösteren, sürtünme altında boyutsal kararlılığını koruyabilen bir malzeme olarak hassas üretim uygulamaları için uygundur. Ancak, yüksek hız (4,5 m/s) ve yüksek yük ($\geq 15N$) altında hacimsel aşınma hızla arttığından, bu koşullarda kullanımında dikkatli olunmalı ve işlem parametreleri sınırlandırılmalıdır.

Bu değerlendirme çalışmanın hedeflediği çok düşük toleranslı, hassas ve hızlı üretim kabiliyetleri açısından PTFE'nin uygunluğunu desteklemektedir, ancak hız/yük optimizasyonu önemlidir.

4.1.3. Sürtünme Katsayıları

Teflon malzemesine 3 m/s ve 4.5 m/s hızda uygulanan aşınma testine ait sürtünme katsayısı (μ) grafiği Şekil 8'de gösterilmiştir.



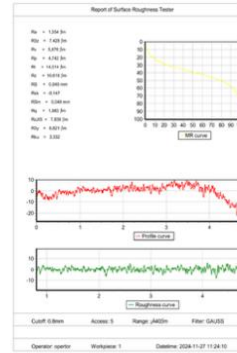
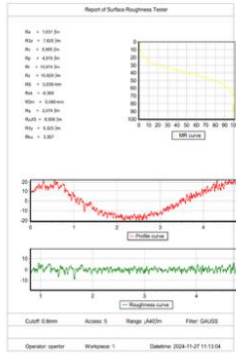
Şekil 8. 3 m/s ve 4.5 m/s hızda uygulanan aşınma testine ait sürtünme katsayıları

- **3 m/s hızda (mavi eğri):** Sürtünme katsayısı yaklaşık 0.42 civarında sabitlenmiş ve hafif dalgalanma göstermektedir. Bu değer oldukça düşüktür ve PTFE'nin karakteristik düşük sürtünme özelliğini doğrulamaktadır.
- **4.5 m/s hızda (kırmızı eğri):** Sürtünme katsayısı biraz daha düşüktür (~0.38) ve daha stabil bir seyir izlemektedir. Bu durum, artan hızla birlikte PTFE'nin yüzeyde daha kaygan bir film oluşturduğunu düşündürmektedir. Her iki hızda da sürtünme katsayısı grafikleri ani sıçramalar, dalgalı geçişler veya kararsızlık içermemektedir, bu da malzemenin tribolojik olarak dengeli çalıştığını göstermektedir.

PTFE, hem düşük hem yüksek hızlarda düşük ve kararlı sürtünme katsayısı göstermektedir. Bu özellik, çalışmanın hedeflediği yüksek hassasiyetli ve düşük aşınmalı üretim gereksinimlerini doğrudan desteklemektedir. Özellikle karmaşık, kilitleme mekanizmalı parçalarda yüzeyde sürtünmeden kaynaklı boyutsal sapmaları minimize etmek açısından bu malzeme son derece avantajlıdır. Grafikteki veriler, PTFE'nin hassas toleranslı fren piston iç-dış sızdırmazlık elemanı kiti gibi uygulamalarda güvenli ve uzun ömürlü performans sağlayacağını göstermektedir.

4.1.4. Yüzey Pürüzlülüğü

Teflon malzemesine 3 m/s ve 4.5 m/s hızda uygulanan aşınma testine ait yüzey pürüzlülüğü grafikleri Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. 3 m/s ve 4.5 m/s hızda uygulanan aşınma testine ait yüzey pürüzlülüğü grafikleri

Hız arttıkça ($3 \text{ m/s} \rightarrow 4.5 \text{ m/s}$) yüzey pürüzlülüğü parametreleri küçük oranlarla azalmıştır. Bu durum, PTFE'nin artan hız altında yüzeyi daha düzgün hale getirecek şekilde aşındığını göstermektedir. R_a ve R_t gibi temel parametrelerdeki düşüş, yüzeyin daha homojen ve düşük profilli hale geldiğine işaret etmektedir. R_{sk} 'nin negatife yakın ama yükselen değeri, yüzeydeki çukurların tepelere göre daha az baskın hale geldiğini gösterir; bu da yük altında daha dengeli temas davranışı sunar. R_{ku} değerleri, her iki hızda da 3'ün biraz üzerinde olup sivri çıkıntıların ve çukurların belirli ölçüde devam ettiğini ancak keskin olmadığını göstermektedir.

- **3 m/s hızda (soldaki grafik):** Yüzey profili daha keskin ve çukur yapılıdır. Eğri boyunca derinlik farkları daha belirgin görülmektedir.
- **4.5 m/s hızda (sağdaki grafik):** Profil daha yatık ve simetrik görünmektedir. Dalgalanmalar daha az, geçişler daha yumuşaktır.

Sonuçlar incelendiğinde, artan hızın PTFE malzemesinin yüzeyini hafif düzleştirdiğini ve daha stabil bir yüzey karakteristiği sunduğunu göstermektedir. Böylece, özellikle sızdırmazlık gibi hassas yüzey teması gerektiren uygulamalarda yüksek hızda bile performans kaybı yaşanmadığı anlaşılmaktadır. Çalışma kapsamında PTFE malzeme ile 3 m/sn ve 4.5 m/sn hızda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin değişimi ve sonuçlar Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Genel Değerlendirme (Yüzey Pürüzlülüğü):

Parametre	PTFE – 3m/s	PTFE – 4.5m/s	Değişim (%)	Sonuç
R_a (μm)	1.631	1.554	↓ ~4.7%	Ortalama pürüzlülük hafif azalmıştır. Yüzey daha düzgün hale gelmiştir.
R_q (μm)	2.074	1.983	↓ ~4.4%	RMS değeri de azalmıştır. Bu durum yüzeyin genel düzgünleşmesini göstermektedir.
R_t (μm)	15.974	14.014	↓ ~12.3%	En yüksek tepe-çukur farkı belirgin biçimde azalmıştır. Mikro çukurlar azalmıştır.
R_z (μm)	10.829	10.618	↓ ~1.9%	Tepe-çukur ortalaması stabil kalmış, büyük değişim olmamıştır.
R_{sk} (μm)	-0.369	-0.147	↑ Daha pozitif	Yüzey profili daha simetrik hale gelmiş; çukurlar azalmıştır.
R_{ku} (μm)	3.357	3.332	≈ Sabit	Yüzeydeki çıkıntılar/çukurların keskinliği aynı kalmıştır.

Tablo 1 incelendiğinde;

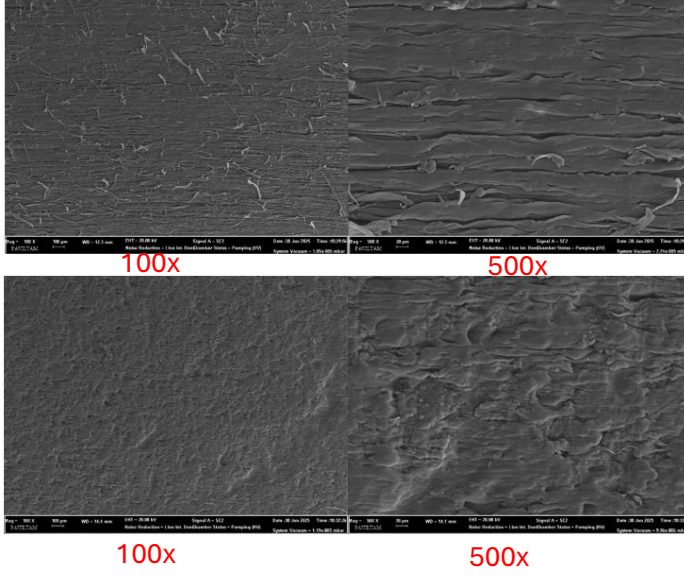
- R_a ve R_q değerlerindeki düşüş, PTFE yüzeyinin hız arttıkça daha düzgün hale geldiğini göstermektedir. Bu, sürtünme yüzeylerinde daha az enerji kaybı ve daha az lokal temas gerilmesi anlamına gelmektedir.
- R_t değerindeki %12 civarındaki düşüş, en yüksek noktalarla en derin çukurlar arasındaki farkın azaldığını, yani mikro tepe ve çukurların daha yumuşadığını göstermektedir. Bu durum, tribolojik olarak daha kararlı bir yüzeye işaret etmektedir.
- R_{sk} değerinin artarak sıfıra yaklaşması, yüzey profilinin çukur ağırlıklı yapıdan daha simetrik hale geldiğini ve temas yüzeylerinin homojenleştiğini göstermektedir.
- R_{ku} değerlerinin sabit kalması, çukur ve çıkıntılarının keskinliğinde önemli bir değişiklik olmadığını; ancak genel profilin daha dengeli hale geldiğini teyit etmektedir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar, PTFE malzemesinin hem 3 m/s hem de 4.5 m/s hızda düşük yüzey pürüzlülüğü ile çalıştığını ve hız arttığında dahi malzemenin yüzey kalitesinin korunduğunu göstermektedir. Bu durum PTFE

malzemesini yüksek performanslı, düşük aşınmalı sızdırmazlık ve sürtünme gerektiren kritik uygulamalar için ideal hale getirmektedir.

4.1.5. SEM Analiz Sonuçları

Teflon malzemesine 3 m/s ve 4.5 m/s hızda uygulanan aşınma testine ait SEM görüntüleri Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10. 3 m/s ve 4.5 m/s hızda uygulanan aşınma testine ait SEM analiz görüntüleri

3 m/s Hız

- Sol (düşük büyütme): Yüzeyde genel olarak homojen, ince çizgiler ve hafif yırtıklar dikkat çekmektedir. Malzeme yüzeyinde düzenli kayma izleri oluşmuştur.
- Sağ (yüksek büyütme): Lifsi yapılar ve yönlenmiş sürtünme izleri görülmektedir. Yüzeyde plastik deformasyon belirtileri vardır ancak büyük parça kopmaları gözlenmemektedir.
- Bu hızda PTFE malzemesi stabil ve kontrollü aşınma davranışı göstermiştir. Yüzeydeki izler, sürtünmenin belirgin fakat tahrip edici olmadığını ortaya koymaktadır.
- Yüzey düzenli, çizgisel ve düşük deformasyonlu olup PTFE'nin tribolojik olarak kararlı çalıştığını göstermektedir.

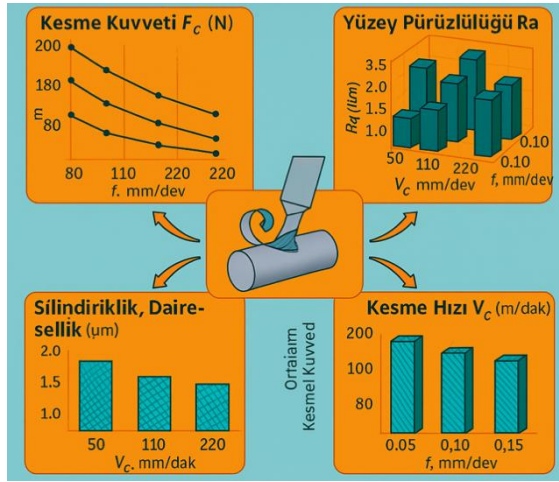
4.5 m/s Hız

- Sol (düşük büyütme): Yüzey daha kaba ve dalgalı bir yapı sergilemektedir. Mikro düzeyde yumuşak deformasyonlar belirgindir.
- Sağ (yüksek büyütme): Yaygın plaka deformasyonu, çökme izleri ve bazı bölgelerde yüzey yırtılmaları izlenmektedir. Lifsi yapı daha karmaşık ve parçalı hale gelmiştir.
- Bu hızda, PTFE malzemesi daha fazla ısı ve mekanik yüke maruz kaldığı için daha belirgin yüzey bozulmaları sergilemektedir. Ancak yine de yapısal kopmalar büyük oranda sınırlıdır.
- Yüzeyde ısı etkileri ve kayma deformasyonları artmış, fakat PTFE'nin kendini toparlayıcı elastik yapısı sayesinde bu bozulmalar yayılmadan sınırlanmıştır.

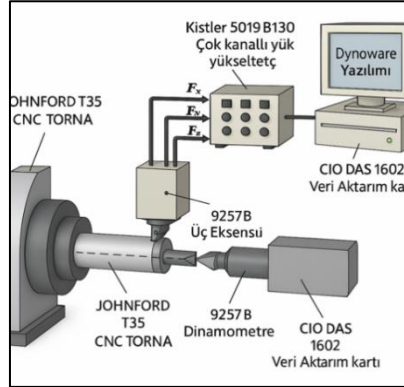
Farklı hızlarda elde edilen görüntü sonuçları karşılaştırıldığında, PTFE malzemesinin orta hızlarda ideal aşınma davranışı sergilediğini, yüksek hızlarda ise performansın sınırlarına yaklaşıldığını ortaya koymaktadır. Ancak her iki durumda da malzeme, kritik bir yüzey hasarı oluşturmamış ve çalışma beklentilerini karşılamıştır.

4.1.6. İşlenebilirlik Testleri

Kesme kuvvetlerinin deneysel olarak incelenmesi amacıyla yürütülen çalışmada, JOHNFORD T35 model CNC torna tezgâhı kullanılmıştır. Deney süresince iş parçası ilgili tezgâha sabitlenerek talaş kaldırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kesme işlemi esnasında oluşan kuvvetlerin hassas biçimde ölçülebilmesi için, kesici takım Kistler 9257B model üç eksenli piezoelektrik dinamometre üzerine monte edilmiştir. Dinamometre, talaş kaldırma işlemi boyunca F_x , F_y ve F_z eksenlerindeki kesme kuvveti bileşenlerini algılamış ve bu kuvvet bileşenlerine karşılık gelen analog sinyaller, Kistler 5019B130 model çok kanallı yük yükselteci (charge amplifier) aracılığıyla uygun seviyelere yükseltilmiştir. Yükseltilmiş analog veriler, CIO DAS 1602 veri toplama kartı vasıtasıyla bilgisayar ortamına aktarılmış ve Dynoware yazılımı aracılığıyla sayısallaştırılarak veri kaydı ve analiz işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu sistematik yaklaşım sayesinde, her bir kesme parametresi kombinasyonu için anlık kesme kuvvetleri ölçülmüş ve bu kuvvetlerin işlenebilirlik üzerindeki etkileri nicel olarak değerlendirilmiştir. Tornalama işleminde kesme parametrelerinin yüzey kalitesi ve geometrik doğruluk üzerindeki etkileri Şekil 11'de, işlenebilirlik test düzeneği görseli Şekil 12'de gösterilmiştir.

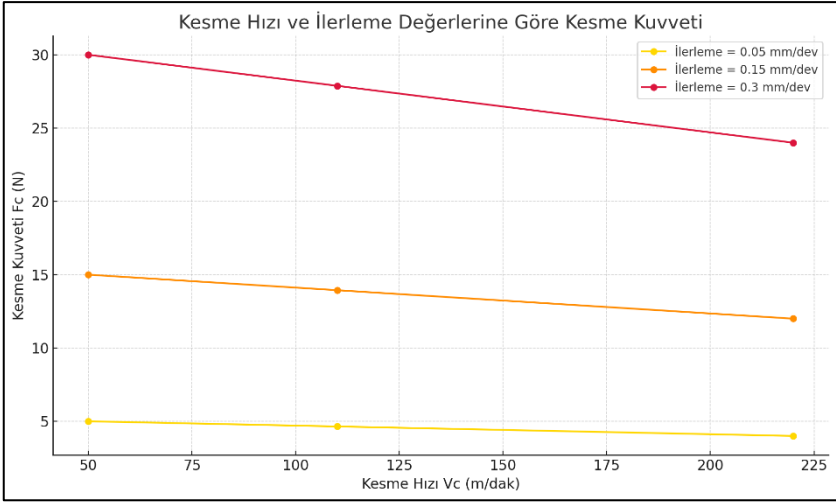


Şekil 11. Tornalama işleminde kesme parametrelerinin yüzey kalitesi ve geometrik doğruluk üzerindeki etkileri Şekil 11'de



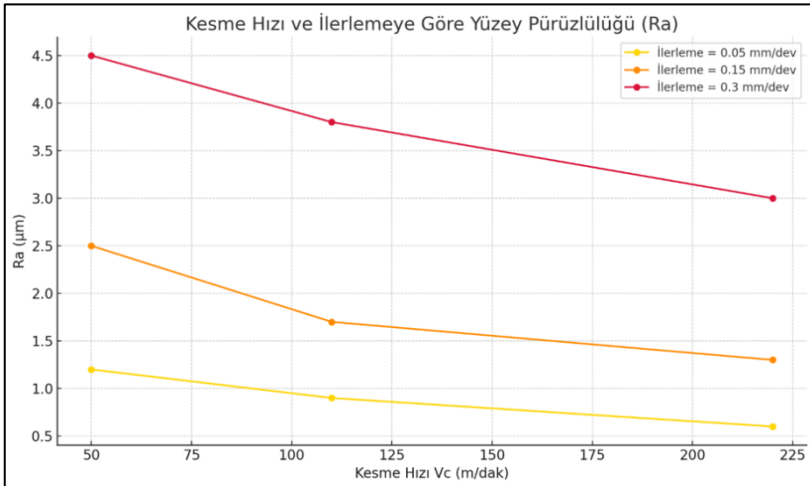
Şekil 12. İşlenebilirlik test düzeneği

PTFE malzemesinin işlenmesinde kesme hızı ve ilerleme değerlerinin kesme kuvveti üzerindeki etkisi Şekil 13'teki grafikte gösterilmiştir.



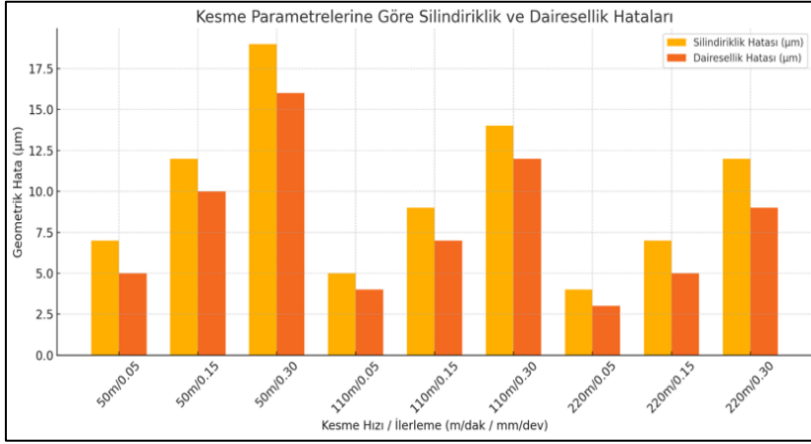
Şekil 13. PTFE malzemesinin işlenmesinde kesme hızı ve ilerleme değerlerinin kesme kuvveti üzerindeki etkisi

Grafik incelendiğinde, ilerleme miktarı arttıkça kesme kuvvetinin belirgin şekilde yükseldiği görülmüştür. En yüksek kuvvet değeri 0.3 mm/dev ilerleme ile 50 m/dk kesme hızında elde edilmektedir. Öte yandan, kesme hızı arttıkça kuvvet azalma eğilimi göstermekte ve bu durum işleme sırasında oluşan sıcaklık artışıyla talaşın daha kolay ayrılmasına bağlanmaktadır. Bu ilişki, hem enerji tüketimini azaltmak hem de takım ömrünü uzatmak için optimum parametre seçiminde önemlidir. PTFE malzemesinin işlenmesinde yüzey pürüzlülüğü değerlerinin kesme hızı üzerindeki etkisi Şekil 14'teki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 14. PTFE malzemesinin işlenmesinde yüzey pürüzlülüğü değerlerinin kesme hızı üzerindeki etkisi

Grafik incelendiğinde, PTFE malzeme işleme sürecinde yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerlerinin kesme hızı arttıkça azaldığı, ilerleme miktarı yükseldikçe ise belirgin şekilde arttığı görülmüştür. En düşük Ra değeri yüksek kesme hızı (220 m/dk) ve düşük ilerleme (0.05 mm/dev) kombinasyonunda elde edilirken, en yüksek pürüzlülük düşük hız ve yüksek ilerleme koşullarında gözlemlenmiştir. Farklı kesme hızı ve ilerleme kombinasyonlarına göre PTFE işleme sürecinde oluşan silindiriklik ve dairesellik hataları Şekil 15'teki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 15. Farklı kesme hızı ve ilerleme kombinasyonlarına göre PTFE işleme sürecinde oluşan silindiriklik ve dairesellik hataları

Grafik incelendiğinde, yüksek ilerleme ve düşük kesme hızı değerleri, geometrik hataları artırırken; yüksek hız ve düşük ilerleme en düşük hata değerlerini sağlamaktadır. Bu durum, hassas tolerans gerektiren sızdırmazlık uygulamaları için işlem parametrelerinin dikkatle seçilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

4.1.7. Ansys Workbench ile Sonlu Elemanlar Analizi

Sonlu elemanlar analizi (FEM), karmaşık geometrilere sahip mühendislik bileşenlerinin gerilme, deformasyon ve temas davranışlarını sayısal olarak değerlendirmek için kullanılan güçlü bir yöntemdir. Bu çalışma, ANSYS Workbench ortamında nonlinear (doğrusal olmayan) yapısal analiz yöntemi ile modellenmiştir. Analizde, malzemenin doğrusal olmayan elastik özellikleri, geometrik büyük deformasyonlar ve temas durumları dikkate alınmıştır.

Analiz çalışması geometri hazırlığı, modelleme, mesh oluşturma ve değerlendirme, malzeme tanımlama ve sonuçların analiz edilmesi olmak üzere beş temel aşamadan oluşmaktadır. Analiz sürecinin ilk adımı, incelenecek

parçanın üç boyutlu geometrisinin oluşturulması veya CAD ortamından içe aktarılmasıdır. Bu aşamada gereksiz detaylar, keskin köşeler veya analiz doğruluğunu etkilemeyecek küçük unsurlar modelden kaldırılmıştır. Ayrıca temas bölgeleri, sınır koşulları ve yükleme alanlarının doğru tanımlanabilmesi için model sadeleştirilmiş ve analiz uyumlu hale getirilmiştir. Geometri hazırlandıktan sonra model, ANSYS Workbench ortamına aktarılmış ve sonlu elemanlara bölünmüştür. Bu aşamada, modelin hacmi belirli sayıda eleman ve düğüm noktasına ayrılarak sistemin matematiksel temsili oluşturulmuştur. Analiz türüne bağlı olarak (statik, termal veya temas analizi) uygun çözüm modülleri seçilmiş, sınır koşulları (sabitleme, yük, basınç, sıcaklık vb.) tanımlanmıştır.

Modelin doğruluğunu doğrudan etkileyen en önemli aşama, uygun mesh yapısının oluşturulmasıdır. Özellikle temas yüzeyleri, gerilme yoğunluğu beklenen bölgeler ve geometrik geçişlerin bulunduğu alanlarda fine mesh (yoğun ağ yapısı) uygulanmıştır. Eleman boyutları, ANSYS'in mesh kalite kriterleri olan aspect ratio, skewness ve orthogonal quality parametreleri dikkate alınarak optimize edilmiştir. Meshleme işlemi tamamlandıktan sonra modelin genel mesh kalitesi incelenmiş ve çözüm için yeterli hassasiyet sağlanmıştır. Analiz doğruluğu, kullanılan malzeme özelliklerinin doğru tanımlanmasına bağlıdır. Bu nedenle, modele ait tüm malzeme parametreleri ANSYS Engineering Data modülünde tanımlanmıştır. Elastik modül (Young Modülü), Poisson oranı, yoğunluk ve ısıl iletkenlik gibi temel malzeme özellikleri girilmiş; elastomer ve PTFE bileşenleri için doğrusal olmayan malzeme davranışları tanımlanmıştır. Gerekğinde malzeme modeli için sıcaklık bağımlı elastisite değerleri de kullanılmıştır.

Geometriler, analiz öncesi “Design Modeller” modülünde “Simplify Geometry” ve “Simplify Topology” özellikleri ile iyileştirilerek analize hazır hale getirilmiştir. Analize ait modelleme görselleri Şekil 16’ da gösterilmiştir.



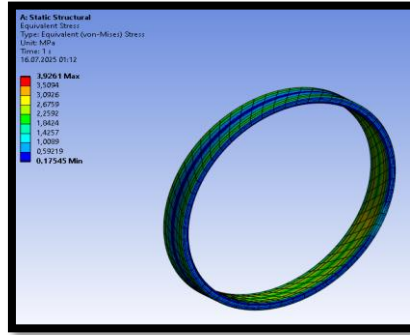
Şekil 16. Sonlu elemanlar analizi modelleme görselleri

Modelin çözümü sonrasında elde edilen sonuçlar, gerilme dağılımları (Von Mises stres), toplam deformasyon, temas basıncı ve kayma gerilmeleri üzerinden değerlendirilmiştir. Temas bölgelerinde oluşan maksimum ve ortalama basınç değerleri incelenmiş; sızdırmazlık yüzeylerinde basıncın homojen dağılıp dağılmadığı analiz edilmiştir. Ayrıca, elde edilen deformasyon değerleri tasarım limitleriyle karşılaştırılarak elastomerik bileşenlerin deformasyon kabiliyetleri doğrulanmıştır. Bu analiz süreci sonunda, sistemin mekanik dayanımı ve temas davranışı başarıyla değerlendirilmiş, elde edilen sonuçlar ışığında geometrik iyileştirmeler ve tolerans optimizasyonları gerçekleştirilmiştir.

4.1.7.1. KİT-1 için Analiz Sonuçları

Equivalent Stress (Von-Mises) Analiz Sonuçları

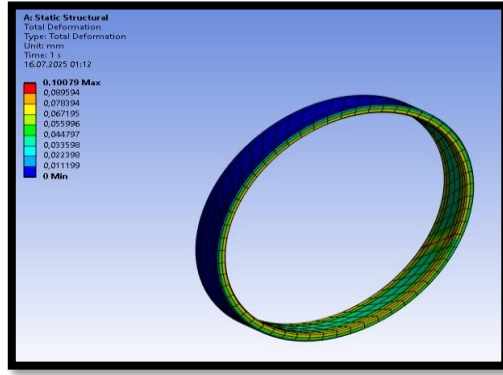
Analizde iç yüzeye 3 MPa bir basınç uygulanmış ve parça yüzeyinde oluşan gerilimin 3,9 MPa olduğu görülmüştür. Bu değer PTFE malzeme için **akma sınırı olan** 14 MPa'nın altında olduğu belirlenmiştir. Kit-1 için Equivalent Stress analiz sonucu Şekil 17'de gösterilmiştir.



Şekil 17. Kit-1 için Equivalent Stress analiz sonucu

Total Deformation Analiz Sonucu

Tasarlanan parçanın servis şartlarında sızdırmazlığı yerine getirip getirmediğini belirleme kriteri açısından total deformasyon oldukça önemlidir. Sonucun < %10 üzerinde olması sızdırmazlık başarısı olarak kabul edilir. Burada oluşan total deformasyonun 0,1 mm olduğu ve sızdırmazlığın başarılı olacağı kabul edilmiştir. Kit-1 için Total Deformation analiz sonucu Şekil 18'de gösterilmiştir.

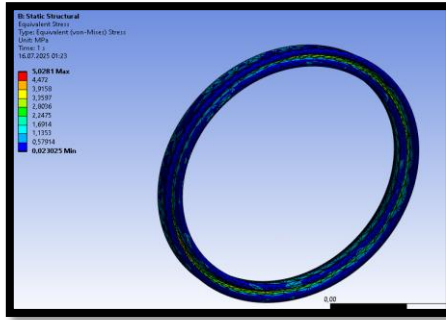


Şekil 18. Kit-1 için Total Deformation analiz sonucu

4.1.7.2. KİT-2 için Analiz Sonuçları

Equivalent Stress (Von-Mises) Analiz Sonuçları

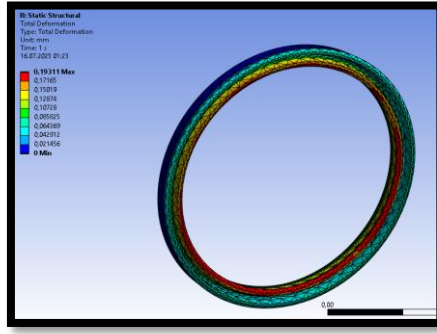
Analizde iç yüzeye 3 MPa bir basınç uygulanmış ve parça yüzeyinde oluşan gerilimin 5,8 MPa olduğu görülmüştür. Bu değerin PTFE malzeme için **akma sınırı olan** 14 MPa'nın altında olduğu belirlenmiştir. Kit-2 için Equivalent Stress analiz sonucu Şekil 19'de gösterilmiştir.



Şekil 19. Kit-2 için Equivalent Stress analiz sonucu

Total Deformation Analiz Sonucu

Tasarlanan parçanın servis şartlarında sızdırmazlığı yerine getirip getirmediğini belirleme kriteri açısından total deformasyon oldukça önemlidir. Sonucun < %10 üzerinde olması sızdırmazlık başarısı olarak kabul edilir. Burada oluşan total deformasyonun 0,19 mm olduğu ve sızdırmazlığın başarılı olacağı kabul edilmiştir. Kit-2 için Total Deformation analiz sonucu Şekil 20'de gösterilmiştir.



Şekil 20. Kit-2 için Total Deformation analiz sonucu

5. DEĞERLENDİRMELER

Bu çalışma kapsamında, büyük çapta, yüksek hassasiyetli, yekpare ve kilitleme mekanizmalı fren piston iç–dış sızdırmazlık kitinin tasarımı, analizleri ve prototip üretimi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Kullanılan PTFE (politetrafloroetilen) esaslı malzeme, düşük sürtünme katsayısı, sınırlı hacim kaybı ve yüksek yüzey stabilitesi sayesinde proje gereksinimlerini etkin biçimde karşılamıştır.

Yapılan aşınma testleri sonucunda, 3 m/s hızda düşük yüzey pürüzlülüğü ve kararlı sürtünme katsayısı değerleri elde edilmiştir. Bu bulgu, PTFE'nin düşük hız koşullarında üstün tribolojik performans sergilediğini göstermektedir. 4.5 m/s gibi daha yüksek hızlarda ise hacimsel deformasyonda artış gözlemlenmiş, ancak malzeme sınır değerleri içerisinde kalarak işlevselliğini korumuştur. SEM analizleri, bu gözlemleri desteklemiş; artan hızla birlikte yüzeyde plastik deformasyonun arttığı, ancak malzemenin bütünlüğünü koruduğu doğrulanmıştır.

PTFE'nin bu özellikleri, karmaşık geometri ve ek işlem gerektirmeyen parçaların üretiminde malzemenin etkin biçimde kullanılabileceğini göstermiştir. Bu sayede CNC tabanlı üretim hatlarında hassas, hızlı ve ekonomik üretim koşulları elde edilmiştir. Proje sürecinde geliştirilen tasarım ve üretim yöntemleri, sızdırmazlık kitlerinin standart toleransların üç katı hassasiyetle üretilmesini sağlamış; bu da özellikle yüksek performans gerektiren endüstriyel uygulamalarda ürün güvenilirliğini önemli ölçüde artırmıştır.

Ayrıca, proje kapsamında oluşturulan optimize edilmiş işlenebilirlik reçetesi, CNC ve talaşlı imalat süreçlerinde hem zaman hem maliyet açısından tasarruf sağlamış, aynı zamanda malzeme davranışlarının daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunmuştur. Böylece üretim süreçleri daha öngörülebilir, kararlı ve tekrarlanabilir hale getirilmiştir.

Üretim performansı açısından, standart çevrim süresi olan 180 saniye 55 saniyenin altına düşürülmüş ve ek işlem gerektirmeden doğrudan CNC üretimi mümkün hale getirilmiştir. SEM/EDS analizleri ve aşınma testleri, geliştirilen sızdırmazlık kitinin uzun ömürlü ve dayanıklı olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, ürünün yüksek güvenilirlik gerektiren uygulamalarda kullanılabileceğini kanıtlamaktadır.

Kompleks geometrili ve kilitleme mekanizmalı sızdırmazlık kitinin geliştirilmesi, sektörde ürün çeşitliliğini ve teknik kapasiteyi artırmış, yerli üretim kabiliyetleri açısından önemli bir rekabet avantajı oluşturmuştur. Ayrıca proje süresince elde edilen bulgular, ileride farklı bileşenlerin tasarımı ve üretiminde kullanılabilecek katma değerli bir bilgi birikimi yaratmıştır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, proje sonucunda yüksek hassasiyetli, dayanımı artırılmış, üretim süresi kısaltılmış ve maliyet açısından verimli bir ürün ortaya konmuştur. Bu çalışma, hem teknik hem de stratejik açıdan sektörde verimlilik, güvenilirlik ve yenilikçilik hedeflerine doğrudan katkı sağlamış; aynı zamanda ülkemizin endüstriyel Ar-Ge yetkinliğinin gelişmesine önemli bir örnek teşkil etmiştir.

KAYNAKLAR

- Biresaw, G., & Mittal, K. L. (2014). *Tribology in engineering*. CRC Press.
- Bloch, H. P., & Geitner, F. K. (2006). *Machinery failure analysis and troubleshooting*. Elsevier.
- Etsion, I. (2010). Hydrostatic and hybrid seals. *Tribology International*, 43(12).
- Hamrock, B. J., Schmid, S. R., & Jacobson, B. O. (2004). *Fundamentals of fluid film lubrication*. CRC Press.
- ISO 3601. (2012). *Fluid power systems — O-rings*. ISO.
- Ivantysyn, J., & Ivantysynova, M. (2001). *Hydrostatic pumps and motors*. Tech Books International.
- Salant, R. F. (2012). Hydrodynamic lubrication of seals. *ASME Journal of Tribology*, 134(2).
- Stachowiak, G. W., & Batchelor, A. W. (2014). *Engineering tribology*. Butterworth-Heinemann.

BÖLÜM 38

Doku Mühendisliğinin Biyomekanik Sınırı: Rejeneratif Tıp için İskele Tabanlı Stratejilerin Kapsamlı Bir Analizi

Ahmet Koluman¹ & Aleyna Sure Öztürk²

¹ Prof. Dr., Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği
ORCID: 0000-0001-5308-8884

² Öğr. Gör., Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi, Patnos MYO, Elektronik ve Otomasyon
Bölümü, Biyomedikal Cihaz Teknolojisi Programı, ORCID: 0000-0001-5533-9018

1. Giriş

Doku mühendisliği, fonksiyonunu yitirmiş doku veya organların işlevlerinin tamamen veya bir kısmının geri kazandırılması için biyolojik ikamelerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapar. Bu kapsamda yeni hücrelerin tutunup çoğalabilmesi ve fiziksel olarak desteklenebilmesi için temel stratejilerden biri çeşitli materyallerden doku iskelesi tasarlanmasıdır [1]. Doku iskeleleri vücut ile etkileşime girerek yeni dokular için matris oluşturduğu için, sağlaması gereken özellikler vardır. Bunlardan en önemlisi; doku iskeleleri doku ile etkileşimi esnasında bağışıklık tepkisi uyandırmamalı ve doğal dokunun sahip olduğu mukavemet, hücre dizilimi ve gözenek yapısı gibi hem fiziksel hem de fizyolojik özelliklerin aslına uygun biçimde gelişmesini sağlamalıdır [2]. Bu bağlamda doku iskelelerinin rolü, hasarlı dokular için yalnızca geçici ve pasif yapısal destek sağlayan platformlar olmaktan çıkıp, hücresel davranışları aktif olarak yönlendiren ve doku rejenerasyonunu orkestra eden akıllı, biyomimetik sistemlere dönüşmüştür. Bu paradigma değişimi, iskele tasarımının temelini oluşturan mekanik bütünlük, biyouyumluluk ve kontrollü biyobozunurluk arasındaki karmaşık dengeyi yeniden tanımlamıştır [3].

3D biyobaskı, elektro-eğirme, 4D baskı ve plazma yüzey modifikasyonu gibi ileri üretim ve fonksiyonelleştirme teknolojileri, bu mekanobiyolojik prensipleri hayata geçirmek için gereken hassasiyeti ve kontrolü sağlamaktadır. Özellikle kemik, kıkırdak ve tendon gibi farklı dokuların benzersiz biyomekanik taleplerini karşılamak üzere geliştirilen dokuya özgü tasarım stratejileri, gradyan yapılı iskeleler gibi yenilikçi çözümleri beraberinde getirmiştir [4]. Sonlu Elemanlar Metodu (FEM) ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) gibi hesaplamalı modelleme araçları, yapay zekâ (AI) ve makine öğrenmesi (ML) algoritmaları ile birleşerek, iskele tasarımını deneme-yanılma süreçlerinden kurtarıp, hasta-spesifik ve optimize edilmiş çözümler üreten öngörüselsel bir alana taşımaktadır [5,6]. Bununla birlikte, vaskülarizasyon (damarlanma), uzun vadeli mekanik stabilite ve bozunma sonucu oluşan yan ürünlerin yönetimi gibi kritik zorluklar, bu teknolojilerin laboratuvarından kliniğe geçişini (klinik translasyon) yavaşlatmaktadır. Sensör entegreli "akıllı iskeleler" gibi gelişen teknolojiler, rejenerasyon sürecini gerçek zamanlı izleme ve yönetme potansiyeli sunarak bu zorlukların üstesinden gelme vaadi taşımaktadır [7].

2. İskele Tabanlı Doku Mühendisliğinde Biyomekanik Zorunluluk

Doku mühendisliği alanı, hasarlı veya hastalıklı doku ve organları onarmak, yenilemek veya değiştirmek için biyoloji, malzeme bilimi ve mühendislik prensiplerini birleştiren devrim niteliğinde bir yaklaşım sunmaktadır. Bu alanın merkezinde, hücrelerin büyümesi ve yeni doku oluşturmaları için bir şablon görevi gören üç boyutlu yapılar olan doku iskeleleri yer almaktadır. Başlangıçta basit

yapısal destekler olarak görülen bu iskelelerin rolü, zamanla biyomekanik faktörlerin doku rejenerasyonundaki kritik öneminin anlaşılmasıyla köklü bir dönüşüm geçirmiştir [3,8].

2.1 Doku İskelelerinin Yeniden Tanımlanması: Pasif Destekten Aktif Rejeneratif Mikro Ortama

Önceden doku iskeleleri, öncelikli olarak hücrelerin ekilebileceği ve boşlukları doldurabilecekleri biyobozunur, geçici yapılar olarak kabul ediliyordu. Bu pasif destek paradigması, iskelenin temel işlevini, hücrelere tutunmaları için bir yüzey sağlamak ve doku oluşana kadar mekanik bütünlüğü korumak olarak tanımlıyordu. Ancak, mekanobiyoloji alanındaki ilerlemeler ile iskelelerin, yalnızca pasif platformlar olmadığı, aynı zamanda hücresel süreçleri aktif olarak yönlendiren biyomimetik mikroçevreler oluşturduğu anlaşılmıştır [9]. Bu görüş değişikliği ihtiyaçların daha iyi anlaşılmasına ve dolayısıyla ihtiyaç analizinin daha doğru yapılmasına olanak tanımıştır. Böylelikle iskele tasarımında doku yenilenmesi ve entegrasyonunu sağlamak için gerekli biyomekanik gereksinimler ele alınmış; gözeneklilik, mekanik dayanım ve yapısal mimarinin doğru dengesinin doğala en yakın yapılar elde etmede kritik olduğu anlaşılmıştır [8]. Modern iskele tasarımları, hücrelere sadece fiziksel bir "ev" sağlamakla kalmaz, aynı zamanda onlara ne olmaları ve nasıl davranmaları gerektiğini söyleyen kimyasal, biyolojik ve mekanik sinyalleri de iletir [9]. Bu evrim, iskelenin doku mühendisliği üçlünün (hücreler, sinyaller ve iskele) entegre edici ve yönlendirici bir bileşeni olarak rolünü pekiştirmiştir. Hücrelerin davranışını değiştirmek veya kontrol etmek için gerekli mekanik ve biyolojik etkileri sağlamak, modern iskele tasarımının merkezine yerleşmiştir [10]. Bu nedenle, günümüzdeki araştırmalar, biyolojik talimatları iskelenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine "kodlamaya" odaklanarak, onu rejenerasyon sürecinin pasif bir izleyicisi değil, aktif bir katılımcısı haline getirmeyi amaçlamaktadır.

2.2 Doku İskelelerinde 3 Temel Prensiptir: Mekanik Bütünlük, Biyouyumluluk ve Kontrollü Biyobozunum

Fonksiyonel bir doku iskelesinin tasarımı, birbiriyle derinden ilişkili ve çoğu zaman birbiriyle çelişen üç temel özelliğin dikkatli bir şekilde dengelenmesini gerektirir: mekanik bütünlük, biyouyumluluk ve kontrollü biyobozunurluk. Bu üçlü, başarılı bir rejeneratif sonucun temelini oluşturur ve herhangi birindeki bir eksiklik, tüm sistemin başarısız olmasına neden olabilir [3].

2.2.1 Mekanik Bütünlük

İskelenin en temel görevlerinden biri, yeni doku oluşup kendi yük taşıma kapasitesine ulaşana kadar implantasyon bölgesinde yapısal destek sağlamaktır. Bu, özellikle kemik gibi yük taşıyan dokular için hayati önem taşır [11]. İskelenin

sertlik (stiffness), elastikiyet ve dayanım (strength) gibi mekanik özellikleri, hedef dokunun özellikleriyle uyumlu olmalıdır [12]. Eğer iskele çok zayıfsa, fizyolojik yükler altında çökebilir; eğer çok sertse, "stres kalkanlaması" (stressshielding) olarak bilinen bir olguya yol açarak çevre kemiğin zayıflamasına neden olabilir [13]. Mekanik uyumsuzluklar enflamasyon oluşumuna ve zayıf entegrasyona sebep olur. Bu da hem kısa hem de uzun süreli performansta fizyolojik uyumluluk ihtiyacını öne çıkarmaktadır.

2.2.2 Biyouyumluluk

Biyouyumluluk, bir malzemenin vücut tarafından kabul edilmesi ve kronik inflamasyon, toksisite veya immünolojik bir red reaksiyonu gibi istenmeyen bir konak immün yanıtına neden olmaması anlamına gelir [14]. Doku iskelesinin biyouyumlu yapıda olması, hücrelerin yapışmasını ve çoğalmasını teşvik eder [15]. Biyouyumluluk prensibi sadece iskelenin kendisi için değil, aynı zamanda bozunma sürecinde ortaya çıkan yan ürünler için de geçerlidir [6]. Bozunma ürünlerinin toksik olmaması ve vücut tarafından güvenli bir şekilde metabolize edilip atılabilmesi gerekir [16].

2.2.3 Kontrollü Biyobozunurluk

İskeleler kalıcı implantlar olarak tasarlanmamıştır. Görevleri, yeni doku oluşumunu desteklemek ve bu süreç tamamlandığında ortadan kalkmaktır. Bu nedenle, iskelenin bozunma hızının, yeni dokunun oluşum ve olgunlaşma hızıyla hassas bir şekilde senkronize edilmesi kritik öneme sahiptir [14]. İskele çok hızlı bozunursa, doku yeterli mekanik güce ulaşmadan yapısal desteğini kaybeder [17]. Çok yavaş bozunursa, dokunun tam entegrasyonunu ve yeniden şekillenmesini engelleyebilir [14]. Aynı zamanda iskelelerin bozunma hızının doku yenilenmesiyle de ilişkilendirilmesi gerekmektedir. Normalin üzerinde veya altında bozunma hızına sahip iskeleler, dokuda bağışıklık yanıtı oluşturabilir ve iyileşmeyi bozabilir [18]. Bu üç temel özellik arasındaki ilişki son derece karmaşıktır. Örneğin, bir iskelenin mekanik dayanımını artırmak için genellikle daha yoğun veya daha az gözenekli bir yapı tercih edilir [11]. Ancak, gözenekliliğin azaltılması, hücrelerin iskele içine göçünü ve besinlerin difüzyonunu engelleyerek biyouyumluluğu ve doku büyümesini olumsuz etkileyebilir [19]. Benzer şekilde, malzemenin kimyasal yapısını bozunma hızını değiştirecek şekilde modifiye etmek, yüzey özelliklerini ve dolayısıyla hücre yapışmasını etkileyebilir [17]. Bu nedenle, iskele tasarımı, bu birbiriyle bağlantılı ve çoğu zaman çelişen hedefler arasında optimal bir denge kurmayı gerektiren çok parametrelili bir optimizasyon problemidir.

2.3 Biyomekanik Belirleyici Olarak Malzeme Seçimi: Doğal ve Sentetik Polimerler ve Kompozitler

Tüm mühendislik çalışmalarında olduğu gibi malzemenin doğru seçimi istenen özelliklerin yansıtılabilmesi için son derece önemlidir. Özellikle doku mühendisliği ve rejeneratif tıp alanında biyomekanik ve biyolojik özelliklerin en önemli parametrelerin başında geldiği göz önünde tutulduğunda, doğru malzeme seçimi elde edilecek ürünün ihtiyaçları yerine getirebilmesi ve gerekli kaliteyi karşılayabilmesi için kritik rol oynar [20]. Glikozaminoglikan ve proteinlerden oluşan ekstraselüler matriks (ECM), hücrelere biyokimyasal ve yapısal destek sunar. Dolayısıyla oluşturulmak istenen doku iskelesi, hücre dışı matrisi ne kadar iyi taklit ederse o kadar iyi biyomekanik özellik sergiler. Böylelikle hücrelerin çoğalıp, doku rejenerasyonunun ve adaptasyonun gerçekleşebileceği nitelikte yapı elde edilmiş olur [3]. Malzeme seçim süreci aşınma, mukavemet ve sertlik gibi çeşitli mekanik özelliklerin yanı sıra dokunun kabul edilmesi ve biyolojik olarak karşıt yanıt oluşturmaması, böylelikle uzun vadede stabilizasyonun sağlanması için biyoyumluluğun eş zamanlı olarak optimize edilmesini gerektirir. Çünkü hiçbir malzeme tek başına tüm uygulamalar için uygun nitelikte değildir [21].

2.3.1 Doğal Polimerler

Kolajen, jelatin, aljinat, kitosan ve hyaluronik asit gibi doğal polimerler, vücudun kendi hücre dışı matrisine (ECM) yapısal ve kimyasal olarak benzemeleri nedeniyle mükemmel biyoyumluluk ve biyoaktivite sunar. Doğal polimerler, hücrelerin tanıdığı ve kolayca yapışabildiği doğal ligandlar içerir, bu da hücre adezyonunu ve dokuya özgü farklılaşmayı teşvik eder [9]. Ancak, en büyük dezavantajları genellikle zayıf mekanik özelliklere ve hızlı, kontrolü zor bozunma profillerine sahip olmalarıdır [17]. Bu durum, onları yük taşıyan uygulamalar için tek başlarına uygunsuz kılar.

2.3.2 Sentetik Polimerler

Polilaktik asit (PLA), poliglikolik asit (PGA), polilaktik-ko-glikolik asit (PLGA) ve polikaprolakton (PCL) gibi sentetik polimerler, mühendislik açısından büyük bir esneklik sunar. Bu malzemelerin mekanik özellikleri (örneğin, sertlik, elastikiyet) ve bozunma hızları, polimerin molekül ağırlığı veya kopolimer oranı gibi parametreler değiştirilerek geniş bir aralıkta ayarlanabilir [9]. Bu öngörülebilirlik, onları uzun vadeli yapısal destek gerektiren uygulamalar için cazip kılar. Bununla birlikte, sentetik polimerler genellikle biyo-inerttir, yani doğal polimerlerde bulunan hücre tanıma bölgelerinden yoksundurlar, bu da hücre etkileşimlerini sınırlayabilir [17]. Ayrıca doğal polimerlere göre daha ucuz ve işlevsel olmaları mevcut çalışmalarda sıklıkla yer almalarına imkân tanır.

2.3.3 Kompozit Yaklaşımlar

Güncel eğilim, doğal ve sentetik polimerlerin avantajlarını birleştiren kompozit iskeleler oluşturmaktır. Bu yaklaşım, "her iki dünyanın en iyisini" elde etmeyi amaçlar. Örneğin, bir PCL iskelesine hidroksiapatit (HAp) gibi bir seramik eklenmesi, kemik doku mühendisliği için hem mekanik dayanımı artırır hem de osteoiletkenliği (kemik büyümesini teşvik etme yeteneği) iyileştirir [17]. Benzer şekilde, sentetik bir polimer matrisine kolajen veya jelatin gibi doğal bir polimerin dahil edilmesi, iskeleye gerekli mekanik gücü sağlarken hücre dostu bir yüzey de sunabilir [9]. Bu kompozit stratejiler, biyolojik fonksiyon ve mekanik performans arasında hassas bir denge kurarak dokuya özgü iskele tasarımlarına olanak tanır.

3. Mekanobiyolojik Diyalog: Hücre-İskele Etkileşimlerinin Şifresini Çözmek

Doku iskelelerinin başarısı, yalnızca uygun malzeme ve mimariye sahip olmalarına değil, aynı zamanda implante edildikleri biyolojik ortamlarla kurdukları karmaşık diyaloga da bağlıdır. Bu diyalog, büyük ölçüde mekanik sinyaller aracılığıyla yürütülür [22]. Hücreler, çevrelerindeki fiziksel dünyayı sürekli olarak "hisseder" ve bu mekanik ipuçlarını, kaderlerini belirleyen biyokimyasal kararlara dönüştürürler. Mekanobiyoloji olarak bilinen bu alan, iskele tasarımının neden sadece bir malzeme bilimi problemi olmadığını, aynı zamanda bir hücre biyolojisi ve biyomekanik problemi olduğunu ortaya koymaktadır [23].

3.1 Mekanik Algılama ve Mekanik Sinyal İletimi: Hücreler Mekanik Planı Nasıl Okuyor?

İskelelerin mekanik uyarımları hücre-çevre etkileşimini etkiler. Hücre farklılaşması, hücre göçü ve sinyalizasyon yollarını manipüle ederek doku onarımı ve yenilenmesinde sonuçları belirleyici rol oynar [24]. Hücrelerin mekanik çevrelerini algılama ve buna yanıt verme yeteneği, iki aşamalı bir süreçle gerçekleşir: mekanosensing (mekanik algılama) ve mekanotransdüksiyon (mekanik sinyal iletimi). Bu süreçler, doku gelişimi, homeostaz, onarım ve hastalık patogeneğinde temel bir rol oynar [25].

3.1.1 Mekanosensing

Hücrelerin, çevrelerindeki hücre dışı matrisin (veya bir doku iskelesinin) sertlik, topografi ve geometri gibi fiziksel özelliklerini aktif olarak test etme ve algılama sürecidir [25]. Hücreler bunu, hücre iskeletlerini kullanarak matrise kuvvet uygulayarak ve matrisin bu kuvvete karşı direncini "hissederek" yaparlar. Böylelikle çevre dokunun fiziksel özelliklerini öğrenmiş olurlar. Bu süreç, bir yüzeyin sertliğini parmağımızla bastırarak test etmemize benzetilebilir [26].

3.1.2 Mekanotransdüksiyon

Mekanosensing ile çevre dokudan algılanan mekanik sinyallerin, hücre içinde biyokimyasal sinyallere dönüştürülmesi ve sonuç olarak gen ekspresyonu gibi hücresel yanıtlara yol açması sürecidir [27]. Mekanik kuvvetler, hücre zarındaki iyon kanallarını (örneğin, Piezo1) aktive edebilir, fokal adezyonlardaki proteinlerin konformasyonunu değiştirebilir ve hatta hücre çekirdeğini doğrudan deforme ederek genlerin erişilebilirliğini etkileyebilir [28]. Bu, fiziksel bir uyarının (kuvvet) kimyasal bir mesaja (sinyal yolağı aktivasyonu) çevrildiği karmaşık bir sinyal kaskadıdır. Bu süreçlerin en temelinde yatan anlayış, mekanik ipuçlarının hücreler için rastgele çevresel gürültüler olmadığıdır. Aksine bunlar, hücrelerin kimliklerini ve davranışlarını belirlemek için yorumladıkları spesifik biyolojik bilgilerdir. Bir büyüme faktörünün reseptöre bağlanarak bir sinyal yolağını tetiklemesi gibi, bir iskelenin sertliği de hücrenin belirli bir farklılaşma yoluna girmesi için bir “talimat” olarak işlev görebilir. Dolayısıyla hücrelerin çevre dokuyu nasıl “okuduğunu” ve ne tür reaksiyonlara yol açtığını bilmek, yeni dokunun uzun vadede orada nasıl yer edineceğini belirler. Bu nedenle, doku mühendisleri bir iskelenin mimarisini tasarlayarak, aslında hücrelerin rejenerasyon sürecinde izlemesi gereken yolu belirleyen bir dizi mekanik talimatı “programlamaktadır” [29].

4. Mühendislikte Hücresel Kader

Mekanobiyolojiden elde edilen bilgiler, doku mühendislerine hücre kaderini hassas bir şekilde kontrol etmek için güçlü araçlar sunmaktadır. Bir iskelenin üç temel fiziksel özelliği – matris sertliği, topografi ve gözeneklilik – hücre davranışını yönlendirmek için stratejik olarak tasarlanabilir [30].

4.1 Matris Sertliği

Bir iskelenin sertliği, belki de en iyi çalışılmış mekanik ipucudur. Çığır açan çalışmalar, mezenkimal kök hücrelerin (MSC’ler) kaderinin, üzerine ekildikleri substratın sertliği tarafından belirlenebileceğini göstermiştir. Örneğin, beyin yumuşaklığını taklit eden (yaklaşık 1 kPa) jeller üzerine ekilen MSC’ler nöron benzeri hücrelere farklılaşırken, kasın esnekliğini taklit eden (yaklaşık 10 kPa) jeller miyojenik (kas) hücrelere, sert kemiği taklit eden (yaklaşık 100 kPa) jeller ise osteojenik (kemik) hücrelere dönüşme eğilimindedir [28]. Buradan yola çıkarak; istenen hücre tipini elde etmek için, iskelenin mekanik özellikleri hedef dokunun doğal mekanik özelliklerini taklit etmelidir.

4.2 Topografi ve Anizotropi

İskelenin yüzeyinin mikro ve nano ölçekteki dokusu ve deseni, hücrelerin şeklini, hizalanmasını ve göçünü güçlü bir şekilde etkiler. Tendon, kas veya sinir

gibi birçok doku, işlevlerini yerine getirmek için hücrelerin ve ECM liflerinin belirli bir yönde hizalandığı anizotropik bir yapıya sahiptir. Elektro-eğirme gibi tekniklerle üretilen hizalanmış nanofiberler, bu doğal anizotropiyi taklit edebilir [31]. Hücreler bu hizalanmış lifler boyunca uzama ve hizalanma eğilimindedir, böylelikle fonksiyonel ve organize bir doku oluşumu teşvik edilir [28].

4.3 Çok Ölçekli Gözeneklilik

Bir iskelenin gözenek yapısı, hücrelerin hayatta kalması ve işlev görmesi için kritik öneme sahiptir. Makro gözenekler ($>100\ \mu\text{m}$), hücrelerin iskelenin derinliklerine göç etmesi, besin ve oksijen taşınımı, atık ürünlerin uzaklaştırılması ve en önemlisi yeni kan damarlarının oluşması için bir rehber yol sistemi görevi görür [32]. Mikro gözenekler ($<100\ \mu\text{m}$) ise iskelenin yüzey alanının önemli ölçüde artmasına sebep olur. Artan yüzey alanı, proteinlerin (hücre yapışmasını sağlayan) adsorpsiyonu için daha fazla alan sağlar ve kılcak kuvvetler (capillary forces) aracılığıyla hücrelerin yüzeye daha sıkı tutunmasına ve stabilizasyona yardımcı olabilir [33]. Doğal kemik gibi bazı dokular hem makro hem de mikro gözenekler içeren hiyerarşik bir yapıya sahiptir. Bu nedenle hem mekanik bütünlüğü hem de biyolojik işlevselliği optimize etmek için çok ölçekli hiyerarşik gözenekliliğe sahip iskeleler tasarlamak, doğal dokuya en yakın taklidi elde etmenin basamaklarından biri olarak güncel bir araştırma alanıdır [34].

5. Sitoskeletonun Güç İletimi ve Yanıttaki Rolü

Hücrelerin mekanik ipuçlarını algılama ve bunlara yanıt verme yeteneğinin temelinde, hücre iskeleti (cytoskeleton) bulunur. Hücre iskeleti, yalnızca hücreye şeklini veren pasif bir yapı değil, aynı zamanda kuvvet üreten ve ileten dinamik bir mekanizmadır. Mekanik sinyallerin aracısı olarak hücrelerin davranış ve iskele ile olan kaderini belirler. Hücre iskeleti, hücre çekirdeği ile hücre dışı matrisin veya iskelenin bağlanmasını sağlar [35]. Aktin ve miyozin filamentlerinden oluşan aktomiyozin hücre iskeleti, hücre içinde sürekli olarak kasılma kuvvetleri üretir [36]. Bu içsel kuvvetler, fokal adezyonlar adı verilen özel protein kompleksleri aracılığıyla hücre dışı matrise (veya iskeleye) iletilir. Fokal adezyonlar, hücre iskeletini dış dünyaya bağlayan “kancalar” olarak düşünülebilir. Ancak bu kancalar aynı zamanda mekanosensörlerdir. Hücre, fokal adezyonlar aracılığıyla matrisi çektiğinde, matrisin sertliği bu çekmeye ne kadar direndiğini belirler. Sert bir matris daha fazla direnç gösterir ve bu direnç, fokal adezyonlar aracılığıyla hücreye geri iletilir. Bu geri bildirim döngüsü, hücre içi gerilimi ayarlar, çekirdeğe kadar iletilir ve bu da hücre şeklini, göçünü ve gen ekspresyonunu düzenleyen sinyal yollarını ve epigenetik modifikasyonu tetikler [28]. Bu mekanizma, iskelenin neden sadece pasif bir gözlemci olmadığını, aksine hücrenin kuvvet algılama sisteminin aktif bir bileşeni haline geldiğini

açıklamaktadır. İskelenin mekanik özellikleri, fokal adezyonlar ile hücrenin kendi iç mekanik durumunu doğrudan etkiler. Bu dinamik kuplaj, iskele tasarımının neden rejeneratif sonuçlar üzerinde bu kadar derin bir etkiye sahip olduğunun temelini oluşturur. İskele, hücrenin kendisini ve çevresini algılayışını şekillendiren mekanik bir uzantı görevi görür [37]. Hücreler değişen iskele geometrileri, yüzey özellikleri ve fiziksel yapılarına ne kadar uyum sağlayabilirse hücre faaliyetleri o denli doğru şekilde işlev görür. Bu sebeple hücre iskeletinin mekanodinamik yapısını anlamak, doku iskelelerinin başarısını doğrudan etkiler [38].

6. İleri Üretim ve Fonksiyonelleştirme Stratejileri

Mekanobiyolojik prensipleri somut ve işlevsel iskelelere dönüştürmek, üretim teknolojilerinin gelişmesi ve yeniliklerin getirilmesini zorunlu hale getirmiştir. Geleneksel üretim yöntemleri, genellikle iskelenin mikro mimarisi üzerinde sınırlı kontrol sunar ve tekrarlanabilirliği düşüktür [39]. Bu sınırlamaların üstesinden gelmek için çeşitli ileri üretim ve fonksiyonelleştirme stratejileri, geliştirilmiştir [10].

6.1 3D Biyobaskı

Kemik, kıkırdak, deri, sinir, damar ve kas-iskelet doku mühendisliğinde uygulanan bu teknoloji, bilgisayar destekli tasarım (CAD) modellerini kullanarak, malzemeleri, hücreleri ve büyüme faktörlerini katman katman biriktirerek üç boyutlu yapılar oluşturur [9]. 3D biyobaskının en büyük avantajı, iskelenin makro mimarisi üzerinde mutlak kontrol sağlaması ve kişiselleştirilebilir iskelelerin üretimine olanak tanımasıdır. Bu sayede, hastanın anatomik verilerinden (örneğin, BT veya MRG taramaları) yola çıkarak tamamen kişiselleştirilmiş, hasta-spesifik iskeleler üretmek mümkündür [40]. Ayrıca, gözenek boyutu, şekli ve dağılımı hassas bir şekilde kontrol edilebilir, bu da besin taşınımını ve vaskülarizasyonu optimize etmek için kritik öneme sahiptir [9]. Genellikle dokuya özgü yenilenmenin desteklenmesi adına büyüme faktörleri ve canlı hücreler ile birleştirilen polimerler, seramikler ve/veya nanomalzemeler, günümüzde biyomürekkep olarak kullanılmaktadır [15]. Çoklu malzeme baskı yetenekleri, farklı bölgelerde farklı malzemeler veya büyüme faktörleri içeren fonksiyonel gradyanlı iskelelerin üretilmesine olanak tanır [9].

6.2 Elektro-eğirme (Electrospinning)

Bu teknik, yüksek voltajlı bir elektrik alanı kullanarak polimer çözeltilerinden nanometre ile mikrometre çapında sürekli lifler üretir [16]. Sonuçta ortaya çıkan nanofiber ağ, biyomimetik bir ortam sağlayarak doğal hücre dışı matrisin (ECM) fibriler yapısını yakından taklit eder [9]. Bu ECM benzeri topografi, hücrelerin tutunması, yayılması ve etkileşimi için ideal bir ortam sağlar. Yüksek yüzey

alanı/hacim oranı ve yüksek oranda birbirine bağlı gözeneklilik, hücre beslenmesini ve iletişimini kolaylaştırır [9]. Nanolif elde edilen çözeltide hem doğal hem de sentetik polimerler kullanılabildiğinden dokunun ihtiyacına göre özelleştirilebilmesine imkân tanır [41]. Elektro-eğirmenin bir diğer önemli avantajı, toplayıcıyı modifiye ederek hizalanmış nanofiberler üretebilme yeteneğidir. Bu, tendon veya kas gibi anizotropik dokuların rejenerasyonu için gerekli olan yapısal yönlendirmeyi sağlar [31]. Bu iki teknolojinin entegre yaklaşımı, doğal dokuların çok ölçekli hiyerarşisini taklit etmede güçlü bir strateji sunar.

6.3 Dördüncü Boyut: Akıllı Malzemeler ve 4D Baskı Kullanarak Zamana Duyarlı İskeleler

Biyolojik süreçler, doğası gereği dinamiklidir. 4D baskı, bu dinamizmi taklit etmeyi amaçlayan, 3D baskıya zaman boyutunu ekleyen devrim niteliğinde bir yaklaşımdır. Bu yaklaşımla birlikte doğal dokuların karmaşık yapıları ve adaptasyon yetenekleri taklit edilmiş olur. 4D baskı, dış bir uyarana maruz kaldığında önceden programlanmış bir şekilde şeklini, özelliklerini veya işlevini zamanla değiştirebilen “akıllı malzemeler” kullanır. Bu malzemeler genellikle şekil hafızalı polimerler veya hidrojellerdir [43]. Bu teknoloji yeni bir yaklaşım ile bazı avantajları beraberinde getirir. Bunlardan biri minimal invaziv girişim ile implantasyondur. 4D baskılı bir iskele, sıkıştırılmış veya katlanmış bir formda üretilerek vücuda minimal invaziv bir cerrahi prosedürle yerleştirilebilir ve vücut sıcaklığı gibi bir uyarana tetiklenerek orijinal, karmaşık ve işlevsel şekline genişleyebilir [44]. Bir diğer avantaj ise sağladığı dinamik mekanik ortamdır. Doku iyileşmesi ilerledikçe, mekanik ortam da değişir. 4D baskı, iyileşme sürecinin farklı aşamalarına uyum sağlayan iskeleler tasarlamaya olanak tanır. Örneğin, bir iskele başlangıçta sert bir destek sağlayabilir ve yeni doku oluştuğunda yavaş yavaş daha esnek hale gelerek mekanik yükü kademeli olarak yeni dokuya aktarabilir [45]. Bu, statik bir iskelenin sunamayacağı, iyileşme süreciyle senkronize olan dinamik bir biyomimikri sağlar.

6.4 Gelişmiş Biyo-Entegrasyon İçin Yüzey Mühendisliği: Plazma Modifikasyonunun Rolü

Bir iskelenin biyolojik performansı, büyük ölçüde hücrelerin ve proteinlerin ilk temas kurduğu yüzey özelliklerine bağlıdır [46]. Malzeme yüzeyi tüm çevre doku ile biyolojik etkileşimi belirler ve bu, doku iskelelerinin yüzey özelliklerini mekanik özellikleri kadar önemli kılar. Birçok sentetik polimer, mükemmel mekanik özelliklere sahip olmalarına rağmen, hidrofobik yüzeyleri nedeniyle hücre yapışmasını ve biyo-entegrasyonu desteklemede yavaş kalır. Plazma yüzey modifikasyonu, iskelenin hacimsel mekanik özelliklerini değiştirmeden sadece

yüzeyin en üst birkaç nanometresini kimyasal olarak değiştirmek için kullanılan güçlü, temiz ve etkili bir tekniktir [46].

Plazma, maddenin iyonize olmuş gaz halidir ve reaktif iyonlar, elektronlar ve radikaller içerir. Bir malzeme yüzeyi plazmaya maruz bırakıldığında, bu reaktif türler yüzeydeki organik kirleticileri temizler ve daha da önemlisi yüzeye yeni kimyasal fonksiyonel gruplar ekler [47]. Özellikle oksijen veya hava plazması kullanıldığında, hidrofobik bir polimer yüzeyine hidroksil (-OH), karboksil (-COOH) ve karbonil (C=O) gibi polar, hidrofilik (su seven) gruplar aşılır [48]. Bu kimyasal değişiklik, yüzey enerjisini ve ıslanabilirliğini önemli ölçüde artırır. Yüksek yüzey enerjisine sahip bir yüzey, kan veya kültür ortamındaki proteinlerin (örneğin, fibronektin, vitronektin) daha hızlı ve daha uygun bir konformasyonda adsorbe olmasını sağlar. Hücreler, bu adsorbe olmuş protein tabakasına integrin reseptörleri aracılığıyla bağlandığından, geliştirilmiş protein adsorpsiyonu doğrudan daha iyi hücre adezyonuna, yayılmasına ve çoğalmasına yol açar [49]. Plazma modifikasyonu, önceden üretilmiş herhangi bir 3D iskeleye uygulanabilen son derece çok yönlü bir “son dokunuş” tekniğidir. Bu, 3D baskı ile üretilmiş mekanik olarak sağlam bir iskelenin yüzeyini, hücreler için çok daha davetkar hale getirerek biyo-entegrasyonu hızlandırmak için ideal bir yöntemdir.

7. Dokuya Özgü Biyomekanik Taklit: Tasarım ve Uygulama

Doku mühendisliğinin temel ilkelerinden biri olan biyomimikri, iskele tasarımında merkezi bir rol oynar. Ancak, “ideal” bir iskelenin biyomekanik özellikleri evrensel değildir; aksine, hedeflenen dokunun spesifik işlevsel gereksinimlerine sıkı sıkıya bağlıdır. Çünkü esneklik, sertlik, anizotropi gibi özellikler, yapıların stres dağıtım şeklini, dokularla etkileşimini ve mekanik yüklere nasıl tepki verdiğini belirler. Örnek olarak kemik için tasarlanmış sert ve güçlü bir iskele, kırık için felaketle sonuçlanırken, tendon için gereken esnek ve anizotropik bir yapı kemik onarımında yetersiz kalacaktır. Bu nedenle, başarılı bir rejeneratif strateji, hedef dokunun doğal mekanik ortamını ve mimarisini derinlemesine anlamayı ve bu özellikleri iskele tasarımına yansıtmayı gerektirir [8,50].

7.1 Yük Taşıyan Yapıların Yeniden İnşası: Kemik Rejenerasyonu İçin Yüksek Dayanıklı İskeleler

Kemik, vücudun yapısal çerçevesini oluşturan bir dokudur. Büyük kusurları doldurma yeteneği kısıtlı olsa da kendi kendini onarma yeteneğine sahip esnek ve yüksek dayanıma sahip bir yapıdadır. İşlevi gereği sürekli olarak önemli mekanik yüklere maruz kalmaktadır. Bu nedenle, kemik rejenerasyonu için tasarlanan iskelelerin birincil biyomekanik gereksinimi, yüksek basma dayanımı ve sertliktir [17]. İskele, iyileşme süreci boyunca kusur bölgesinin çökmesini

önlemeli ve fizyolojik yükleri taşıyabilmelidir [51]. Bu gereksinimleri karşılamak için en yaygın strateji, polimer ve seramik malzemeleri birleştiren kompozit iskeleler kullanmaktır. Polikaprolakton (PCL) gibi işlenebilirliği yüksek sentetik polimerler, iskelenin temel yapısını oluştururken, doğal kemiğin mineral fazını oluşturan hidroksiapatit veya diğer kalsiyum fosfat seramikleri, iskelenin sertliğini ve basma dayanımını artırmak için dahil edilir [17]. Seramik faz, aynı zamanda osteoiletken bir yüzey sağlayarak kemik hücrelerinin (osteoblastlar) yapışmasını ve yeni kemik matrisi üretmesini teşvik eder. Mimari olarak, kemik iskeleleri kemiğin doğal süngerimsi (trabeküler) yapısını taklit etmeyi amaçlar. Bu, yüksek oranda birbirine bağlı, çok ölçekli hiyerarşik bir gözenek ağı anlamına gelir [11]. Büyük makro gözenekler, hücre infiltrasyonunu, besin taşınımını ve en önemlisi kan damarlarının büyümesini sağlarken, mikro gözenekler yüzey alanını artırarak protein adsorpsiyonunu ve hücre tutunmasını iyileştirir [52].

7.2 Esneklik ve Sıkıştırma İçin Tasarım: Kıkırdak Onarımı Stratejileri

Eklem kıkırdağı, kemiğin aksine, avasküler (damarsız) ve düşük sürtünmeli bir yüzey sağlayan, karmaşık basma ve kesme yüklerine maruz kalan viskoelastik bir dokudur [11]. Kıkırdak rejenerasyonu için tasarlanan iskeleler, bu esnekliği ve dayanıklılığı taklit etmelidir. Ayrıca kemik dokuya zarar verebileceği için yüksek sertlik, kıkırdak iskelelerinde istenmeyen bir unsurdur. Bu nedenle, kıkırdak mühendisliğinde en sık kullanılan malzemeler, yüksek su içeriğine sahip olan ve doğal kıkırdak dokusunun mekanik özelliklerine benzeyen hidrojellerdir [51]. Alginat, kitosan, hyaluronik asit veya jelatin metakrilol (GelMA) gibi malzemelerden yapılan hidrojeller, hücrelerin üç boyutlu bir ortamda kapsüllenmesine ve kıkırdak matrisi üretmesine olanak tanır. Kıkırdak avasküler olduğundan, iskelenin tasarımı, besinlerin ve oksijenin difüzyon yoluyla hücrelere ulaşmasını sağlamak için yüksek oranda birbirine bağlı bir gözenek ağına sahip olmaya odaklanır [11].

7.3 Çekme Dayanımı İçin Anizotropik İskeleler: Tendon ve Bağ Doku Mühendisliği

Tendonlar ve ligamentler, kasları kemiklere veya kemikleri kemiklere bağlayan ve birincil olarak yüksek çekme (tensil) kuvvetlerine direnmek üzere tasarlanmış bağ dokularıdır. Bu işlevi yerine getirmek için, yapıları oldukça organize ve anizotropiktir; yani, mekanik özellikleri yöne bağlıdır. Bu dokular, çekme kuvveti eksenine boyunca hizalanmış yoğun kolajen lif demetlerinden oluşur [53]. Tendon ve ligament mühendisliği için tasarlanan iskeleler, bu yapısal anizotropiyi taklit etmek zorundadır. Anizotropik iskelelerin tasarımı, tendon ve ligament doku mühendisliğinde hücresel işlevleri optimize etmek ve çekme dayanımını desteklemek için kritik bir rol oynar. Bu amaçla en yaygın kullanılan

teknik, hizalanmış nanofiberler üretebilen elektro-eğirmedir [53]. Bu hizalanmış lifler, tenositlerin veya fibroblastların iskele boyunca hizalanması ve yönlendirilmiş bir ECM üretmesi için topografik bir ipucu görevi görür. Liflerin hizalı olması çekme dayanımını ciddi seviyelerde arttırabilir ve elastik modülü iyileştirir [54]. Nihai hedef, doğal tendonun olağanüstü çekme dayanımını yeniden oluşturabilen, organize ve fonksiyonel bir doku elde etmektir [55].

7.4 Örgü Dokuları: Karmaşık Arayüzler için Gradient İskeleleri

Vücuttaki en zorlu biyomekanik bölgelerden biri, tendon veya ligament gibi yumuşak bir dokunun kemik gibi sert bir dokuya bağlandığı arayüzlerdir (örneğin, entezis). Bu bölgelerde, mekanik özelliklerde ani bir değişiklik meydana gelir ve bu da cerrahi onarımlardan sonra bile yüksek stres yoğunlaşmalarına ve başarısızlık oranlarına yol açar [31]. Doğal entezis, bu problemi, yumuşak tendondan mineralize olmayan fibrokartilaja, ardından mineralize fibrokartilaja ve son olarak kemiğe doğru kademeli bir geçişle çözer [31]. Bu gradyan yapı, mekanik stresi yumuşak bir şekilde dağıtarak stres yoğunlaşmasını önler. Bu doğal yapıyı taklit etmek için gradyan iskeleler geliştirilmiştir [31]. Bu iskeleler, bir uçtan diğerine malzeme bileşiminde (örneğin, mineral içeriğinin kademeli olarak artırılması), mimaride (örneğin, hizalanmış liflerden rastgele liflere geçiş) ve mekanik sertlikte sürekli bir gradyan içerecek şekilde tasarlanır [31]. Bu biyomimetik yaklaşım, stres yoğunlaşmasını en aza indirerek ve farklı hücre tiplerinin entegre bir şekilde büyümesini teşvik ederek, fonksiyonel ve stabil bir arayüzün rejenerasyonunu hedefler [56].

8. Dijital Sınır: Hesaplamalı ve Yapay Zekâ Güdümlü İskele Optimizasyonu

Doku mühendisliği iskelelerinin tasarımı, sayısız malzeme, mimari ve biyolojik değişkenin etkileşimini içeren son derece karmaşık bir süreçtir. Geleneksel olarak, optimal tasarımları bulmak, zaman alıcı ve maliyetli deneme-yanılma temelli deneysel çalışmalara dayanıyordu. Ancak, hesaplamalı modelleme ve yapay zekâ (AI) alanlarındaki ilerlemeler, bu paradigmayı kökten değiştirmektedir. In silico (bilgisayar ortamında) araçlar, iskele tasarım sürecini analizden senteze, yani insan tarafından oluşturulan bir tasarımı değerlendirmekten, otonom olarak yeni ve optimize edilmiş bir tasarım üretmeye doğru kaydırmaktadır [57,58].

8.1 Öngörücü Biyomekanik: İskele Analizinde Sonlu Eleman Yöntemi (FEM) ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD)

Hesaplamalı modelleme, fiziksel prototipler üretmeden ve deneyler yapmadan önce bir iskelenin davranışını sanal ortamda test etme imkânı sunar. Bu alanda en yaygın kullanılan iki yöntem FEM ve CFD'dir. FEM, bir iskelenin karmaşık

geometrisini “sonlu elemanlar” adı verilen daha küçük ve basit parçalara ayırarak, çeşitli yükleme koşulları altında mekanik davranışını tahmin etmek için kullanılan güçlü bir sayısal tekniktir [59]. FEM analizi, iskele içindeki gerilme (stress) ve gerinim (strain) dağılımlarını hesaplayabilir. Bu, potansiyel zayıf noktaları ve mekanik arıza riskini belirlemeye, mimariyi mekanik stabilite için optimize etmeye ve iskelenin hedef dokunun mekanik özelliklerine ne kadar uyduğunu değerlendirmeye yardımcı olur [40]. Örneğin, bir kemik iskelesinin fizyolojik yükler altında çöküp çökmeyeceği FEM ile öngörülebilir. Doku rejenerasyonu sadece mekanik stabiliteye değil, aynı zamanda hücrelere yeterli besin ve oksijenin ulaştırılmasına da bağlıdır. CFD, bir iskelenin gözenekli yapısı içindeki akışkan (örneğin, biyoreaktördeki kültür ortamı veya vücuttaki kan) akışını modellemek için kullanılır [59]. CFD analizi, besin dağılımını, oksijen taşınımını ve atıkların uzaklaştırılmasını tahmin edebilir. Ayrıca, akışkanın gözenek duvarlarında oluşturduğu kayma gerilmesini (wallshearstress) hesaplayabilir. Bu kayma gerilmesi, hücreler için önemli bir mekanobiyolojik uyarandır. Bu nedenle, CFD sonuçları hücre farklılaşmasını ve doku büyümesini teşvik eden akış koşullarını optimize etmek için kullanılabilir [40]. Bu araçlar, mühendislere tasarımlarını sanal olarak test etme ve iyileştirme olanağı tanıyarak, deneysel süreci önemli ölçüde hızlandırır ve maliyetini düşürür. Ancak, bu yöntemler doğası gereği analitiktir; yani, bir insan tarafından önerilen bir tasarımı değerlendirirler, kendi başlarına yeni bir tasarım oluşturmazlar.

8.2 Tasarım Otomasyonu İçin Makine Öğrenimi: Gözenekliliği, Geçirgenliği ve Mekanik Dayanıklılığı Optimize Etmek

Bir iskelenin tasarım alanı (malzeme türü, gözenek boyutu, gözenek şekli, bağlantı derecesi vb. kombinasyonları) neredeyse sonsuzdur. Bu devasa alandaki her olası tasarımı FEM veya CFD ile tek tek analiz etmek, hesaplama açısından imkansızdır [60]. İşte bu noktada makine öğrenmesi (ML) devreye girer. Sonuç performansının öngörülmesi, spesifik uygulamalarda optimal malzeme kombinasyonlarının belirlenmesi ve sonrasında klinik sonuçlardan seçim kriterlerini iyileştirme uygulamalarında, makine öğrenmesi modelleri başrol oynamaktadır [61]. Buradan yola çıkarak ML algoritmaları, iskele tasarımını otomatikleştirmek ve optimize etmek için güçlü bir araç sunar. Süreç genellikle aşağıdaki sıralama ile ilerler.

8.2.1 Veri Üretimi

Farklı tasarım parametrelerine sahip (örneğin, farklı gözeneklilik ve gözenek boyutları) bir dizi iskele geometrisi oluşturulur. Bu geometrilerin mekanik ve akışkan özellikleri, FEM/CFD simülasyonları veya deneysel testler kullanılarak hesaplanır [5, 62]

8.2.2 Model Eğitimi

Bu simülasyon/deney verileri, bir ML modelini (örneğin, bir sinir ağı veya rastgele orman modeli) eğitmek için kullanılır. Model, tasarım parametreleri (girdi) ile sonuçtaki performans metrikleri (örneğin, elastik modül, geçirgenlik) (çıkı) arasındaki karmaşık, doğrusal olmayan ilişkileri öğrenir [63].

8.2.3 Hızlı Tahmin ve Optimizasyon

Eğitildikten sonra, ML modeli yeni bir tasarımın özelliklerini saniyeler içinde, tam bir FEM/CFD simülasyonu çalıştırmaya gerek kalmadan yüksek bir doğrulukla tahmin edebilir. Bu hızlı tahmin yeteneği, Bayes optimizasyonu veya genetik algoritmalar gibi optimizasyon algoritmaları ile birleştirilir. Bu algoritmalar, ML modelini kullanarak tasarım alanını verimli bir şekilde araştırır ve birbiriyle çelişen hedefleri (örneğin, mekanik dayanımı en üst düzeye çıkarırken hücre büyümesi için yeterli gözenekliliği korumak) dengeleyen optimal iskele mimarilerini belirler [60].

8.3 Kişiselleştirilmiş Tıbbı Doğru: Hastaya Özel İskele Tasarımı İçin Yapay Zekâ Algoritmaları

Yapay zekâ güdümlü optimizasyonun nihai hedefi, her hastanın benzersiz anatomik ve fizyolojik ihtiyaçlarına göre özel olarak tasarlanmış iskeleler oluşturmaktır. Böylelikle klinik sonuçları iyileştirir, doğruluğu artırır ve kişiye özel iskelelerin tasarımını hızlandırır. Fonksiyonel ve biyouyumlu iskeleler üreterek uzun vadeli performansı artırır [64,6]. Bu entegre yaklaşım, tıbbi görüntüleme, biyomekanik analiz ve tasarım optimizasyonunu tek bir akıcı süreçte birleştirerek, rejeneratif tıpta gerçek anlamda kişiselleştirilmiş tedavilerin önünü açmaktadır.

9. Klinik Translasyonda Kritik Engeller ve Gelişen Ufuklar

Doku mühendisliği alanında laboratuvar ortamında elde edilen sayısız bilimsel başarıya rağmen, bu umut verici teknolojilerin hastaların yararına sunulacağı klinik uygulamalara geçişi (klinik translasyon), önemli engellerle doludur. Bu süreçte, bilimsel olarak başarılı birçok iskele konsepti, pratik, biyolojik ve düzenleyici zorluklar nedeniyle ticari bir ürüne dönüşmemektedir [17].

9.1 Vaskülarizasyon Zorluğu: Mekanik Bütünlükten Ödün Vermeden Kan İletimini Sağlamak

Doku mühendisliğindeki belki de aşılması en güç zorluk vaskülarizasyondur. İnsan vücudundaki hücrelerin büyük çoğunluğu, bir kan damarından en fazla 100-200 µm uzakta yaşar. Bu mesafenin ötesinde, difüzyon yoluyla oksijen ve besin taşınımı yetersiz kalır ve hücreler ölür [32]. Küçük veya ince doku kusurlarında, konakçı dokudan yeni kan damarlarının iskele içine doğru büyümesi yeterli olabilir. Ancak, klinik olarak anlamlı boyuttaki büyük doku yapıları için bu süreç çok daha yavaştır [23]. Sonuç olarak, büyük bir iskelenin merkezindeki hücreler, yeterli kanlanma sağlanmadan önce hipoksi (oksijen yetmezliği) nedeniyle ölür, bu da implantın başarısız olmasına yol açar [66]. Ancak yeterli vaskülarizasyonu sağlarken mekanik bütünlüğü korumak büyük bir zorluktur. Damarlanmayı arttırmak için iskele mimarisine büyük kanallar veya gözenekler eklemek, iskelenin genel mekanik bütünlüğünü ve yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde azaltabilir [66]. Bu, vaskülarizasyon ile mekanik stabilite arasında temel bir ikilem yaratır. Bu zorluğun üstesinden gelmek için geliştirilen çeşitli stratejilerden biri pre-vaskülarizasyondur. Bu yöntemde iskeleler, endotel hücreleri ile birlikte in vitro ortamda kültürlenerek, implantasyondan önce iskele içinde bir kılcıl damar ağı oluşturulur [23]. Anjiyojenik faktörlerin salımı yönteminde ise vasküler endotelyal büyüme faktörü (VEGF) gibi anjiyogenezi (yeni kan damarı oluşumunu) teşvik eden büyüme faktörleri iskeleden kontrollü bir şekilde salmak amaçlanmaktadır [67]. Bu alanda çalışılan bir diğer yöntem ise; 3D baskı gibi teknolojileri kullanarak, mekanik bütünlüğü en az düzeyde etkilerken kan damarı büyümesini yönlendirecek hiyerarşik gözenek ağları veya mikroakışkan kanallar içeren iskeleler tasarlamayı amaçlayan gelişmiş mimari tasarımlardır [23]. Mekanik özelliklerden ödün vermeden vaskülarizasyonun sağlanmasına yönelik optimize edilmiş gözenek yapısı, kan damarlarının entegrasyonuna yönelik çok katmanlı yapılar ve biyomimetik tasarımlar ön plana çıkmaktadır [68, 69]. Vaskülarizasyon sorununun çözümü, doku mühendisliğinin büyük ve karmaşık organları rejenere etme hedefine ulaşması için mutlak bir ön koşuldur.

9.2 Bozunma İkilemi: Uzun Vadeli İstikrarın Sağlanması ve Yan Ürünlerin Yönetimi

Biyobozunur iskelelerin temel tasarım prensibi, yeni doku oluşukça yavaş yavaş ortadan kalkmalarıdır. Uzun vadede başarılı performansın sağlanabilmesi için mekanik bütünlük, kontrollü bozunma ve yan ürünlerin biyoyumluluğu optimize edilmelidir. Bozunma hızı ile doku oluşum hızını eşleştirmek ve bozunma yan ürünlerini yönetmek bu süreçteki temel zorluklardır [70]. İdeal doku mühendisliğinde bir iskelenin mekanik özelliklerini kaybetme hızı, yeni

oluşan dokunun mekanik yükü üstlenme hızıyla mükemmel bir şekilde eşleşmelidir. Eğer iskele çok hızlı bozunursa, doku henüz yeterince olgunlaşmadan yapısal destek ortadan kalkar ve kusur bölgesi çökebilir [17]. Bu, özellikle yük taşıyan kemik uygulamalarında kritik bir başarısızlık nedenidir. Tersine, iskele çok yavaş bozunursa, dokunun doğal yeniden şekillenme sürecini engelleyebilir ve yabancı cisim reaksiyonlarına neden olabilir. Bozunma süreci, iskele malzemesini daha küçük moleküllere ayırır. PLA ve PLGA gibi yaygın olarak kullanılan polimerlerin bozunması, laktik asit ve glikolik asit gibi asidik yan ürünler ortaya çıkarır. Bu asidik ürünlerin lokal olarak birikmesi, Ph'ı düşürerek çevredeki hücreler için toksik bir ortam yaratabilir ve kronik bir inflamatuvar yanıtı yol açarak doku rejenerasyonunu engelleyebilir [14,17]. Bu ikilemi çözmeye yönelik yaklaşımlar arasında, daha yavaş bozunan (PCL gibi) veya daha az asidik yan ürünler üreten yeni polimerler geliştirmek, asidik yan ürünleri nötralize edebilecek biyoaktif seramikleri (hidroksiapatit gibi) kompozit yapılara dahil etmek ve 4D baskı gibi teknolojilerle bozunma hızının in situ olarak kontrol edilebildiği akıllı iskeleler tasarlamak yer almaktadır [16,17].

9.3 Akıllı İskeleler: Doku Yenilenmesinin Gerçek Zamanlı İzlenmesi İçin Entegre Sensörler

Geleneksel implantlar, vücuda yerleştirildikten sonra bir “kara kutu” gibidir. Bu kara kutular pasif yapıda olup doku iyileşme sürecinin nasıl ilerlediği hakkında yalnızca dolaylı yollarla çok az bilgi verirler ve bir sorun ancak klinik semptomlar ortaya çıktığında fark edilir. Bu paradigmada devrim yaratma potansiyeli taşıyan yeni bir alan, rejenerasyon sürecini gerçek zamanlı olarak izleyebilen sensör entegreli “akıllı iskeleler”dir [44]. Bu teknoloji, komplikasyonların erken teşhis edilebilmesi, klinik olarak daha iyi yönetim ve hasta sonuçlarını iyileştirebilmeyi mümkün kılar [71]. Yapısal olarak manipüle edilebilir biyolojik olarak duyarlı malzemelerden üretilen akıllı iskelelere entegre edilen mikro sensörler, iyileşme mikroçevresindeki kritik parametreleri eş zamanlı olarak izleyebilir [44]. Bu parametrelerden biri mekanik gerilmedir. İskelenin ne kadar yüke maruz kaldığını ölçerek, yeni dokunun yükü ne zaman devralmaya başladığını ve implantın mekanik olarak entegre olup olmadığını belirleyebilir. Bununla birlikte Ph ve oksijen seviyeleri gibi biyokimyasal değişkenleri takip ederek hücrelerin metabolik sağlığı ve canlılığı hakkında bilgi verebilir. Örneğin, düşük oksijen seviyeleri yetersiz vaskülarizasyona işaret edebilir. Ayrıca bakteriyel biyofilm oluşumunu erken aşamada tespit edebilen biyosensörler, implant enfeksiyonlarının yıkıcı sonuçları ortaya çıkmadan erken teşhis ile önce müdahale edilmesine olanak tanır [72]. Akıllı iskelelere entegre edilen sensörlerin doku iyileşme mikroçevresinden almış olduğu veriler, kablosuz olarak dış bir cihaza iletilerek klinisyenlere iyileşme süreci hakkında

benzeri görülmemiş bir içgörü sunabilir [71]. Gelecekte, bu sensörler, ilaç salımı gibi terapötik eylemleri tetikleyen aktüatörlere bağlanarak, rejenerasyon sürecini otonom olarak yönetebilen kapalı döngü sistemler oluşturabilir [72].

9.4 Laboratuvar dan Uygulamaya: Ölçeklenebilirlik, Maliyet ve Düzenleyici Engellerin Üstesinden Gelmek

9.4.1 Ölçeklenebilirlik ve Maliyet

Laboratuvar ortamında tek bir karmaşık, hasta-spesifik iskele üretmek mümkündür. Ancak bu süreci, binlerce hasta için tutarlı kalitede, steril ve uygun maliyetli bir şekilde tekrarlamak büyük bir üretim mühendisliği sorunudur [73]. Otomasyon ve daha verimli üretim iş akışları, bu ölçeklenebilirlik engelini aşmak için kritik öneme sahiptir.

9.4.2 Düzenleyici Onay Süreçleri

Doku mühendisliği ürünleri genellikle bir cihaz (iskele), hücreler ve/veya biyolojik ajanları (büyüme faktörleri) birleştiren “kombinasyon ürünleri” olarak sınıflandırılır. Bu tür ürünler için ABD Gıda ve İlaç Dairesi (FDA) gibi düzenleyici kurumların onay süreçleri son derece karmaşık, uzun ve maliyetlidir. Güvenlik, etkinlik ve üretim tutarlılığını kanıtlamak için kapsamlı in vitro, hayvan ve insan klinik çalışmaları gereklidir [74].

9.4.3 Klinik Lojistik

Hücre kaynağının temininden (örneğin, hastadan otolog hücrelerin alınması), iskelenin üretilmesine, hücrelerin ekilmesine ve son olarak hastaya implante edilmesine kadar olan tüm sürecin, klinik olarak uygulanabilir bir zaman dilimi ve lojistik çerçeve içinde yönetilmesi gerekmektedir [73].

Tablo 1: Klinik Translasyondaki Temel Zorluklar ve Karşılık Gelen Yenilikçi Çözümler

Zorluk	Altta Yatan Biyomekanik/Biyolojik Problem	Gelişen Yenilikçi Çözüm(ler)	İlgili Kaynaklar
Vaskülarizasyon Eksikliği	Kan damarlarından >200 µm uzakta besin/oksijen yoksunluğu, çekirdek nekrozuna ve implant başarısızlığına yol açar.	Pre-vaskülarizasyon stratejileri; gömülü mikrokanalı iskeleler, anjiyojenik faktörlerin salımı.	32
Uyumsuz Bozunma Hızı	İskelenin kalıcılığı nedeniyle mekanik desteğin erken kaybı veya gecikmiş yeniden şekillenme.	Programlanabilir bozunma için 4D baskı; ayarlanabilir bozunma profillerine sahip kompozit malzemeler.	17
İstenmeyen Konak Yanıtı	Asidik bozunma yan ürünleri veya zayıf biyouyumluluktan kaynaklanan inflamasyon.	Plazma yüzey modifikasyonu; zararsız yan ürünleri olan polimerlerin kullanımı, anti-inflamatuar ajanların dahil edilmesi.	17
İmplant Başarısızlığı / Enfeksiyon	İyileşme sürecini in situ izleyememe, mekanik arıza veya enfeksiyonun geç tespitine yol açar.	Gerinim, Ph, oksijen ve biyofilmleri gerçek zamanlı izlemek için entegre sensörlere sahip "akıllı" iskeleler.	44
Ölçeklenebilirlik ve Maliyet	Karmaşık, ısırmama üretim yöntemleri, sağlam, uygun maliyetli, büyük ölçekli üretime uygun değildir.	Biyobaskıda otomasyon; daha verimli ve ölçeklenebilir üretim iş akışlarının geliştirilmesi.	73

10. Stratejik Bakış ve Öneriler

Bu çalışma, doku mühendisliği iskelelerinin biyomekanik alanındaki evrimini, temel prensiplerden en ileri teknolojilere ve klinik uygulamaların önündeki engellere kadar geniş bir perspektifte ele almıştır. Analiz, alanın pasif yapısal destekler üretmekten, doku rejenerasyonunu aktif olarak yöneten karmaşık, akıllı sistemler tasarlamaya doğru belirgin bir geçiş yaptığını ortaya koymaktadır.

10.1 Ana Bulguların Sentezi: Malzeme Bilimi, Mekanobiyoloji ve Yapay Zekanın Birleşimi

Doku mühendisliğinin geleceği, tek bir disiplinin sınırları içinde değil, üç temel alanın kesişiminde şekillenmektedir: malzeme bilimi, mekanobiyoloji ve yapay zekâ. Bu üç alanın yakınsaması, daha önce aşılamaz görünen zorlukların üstesinden gelmek için sinerjistik bir etki yaratmaktadır [75]. Malzeme Bilimi, rejenerasyon için gerekli olan fiziksel ve kimyasal temeli sağlayan “yapı taşlarını” sunar. Biyobozunur polimerler, biyoaktif seramikler ve akıllı malzemelerdeki yenilikler, mühendislere benzeri görülmemiş bir tasarım esnekliği sunmaktadır [76]. Diğer tarafta mekanobiyoloji, bu yapı taşlarının nasıl bir araya getirileceğini belirleyen “tasarım kurallarını” veya “biyolojik planı” sağlar. Hücrelerin mekanik ipuçlarını nasıl yorumladığını ve bunlara nasıl yanıt verdiğini anlamak, iskelelerin sadece yapısal olarak değil, aynı zamanda biyolojik olarak da işlevsel olmasını sağlar [77]. Yapay zekâ ise, bu karmaşık tasarım kurallarını, optimize edilmiş ve kişiselleştirilmiş yapılara dönüştüren “mühendislik araçlarını” sağlar. AI ve ML, devasa tasarım alanlarını keşfetmek, birbiriyle çelişen hedefleri dengelemek ve insan sezgisinin ötesinde çözümler üretmek için gerekli hesaplama gücünü sunar [64,65]. Bu üç alanın entegrasyonu, iskele tasarımını bir sanattan, veri güdümlü bir bilime dönüştürmektedir. Başarılı bir iskele artık sadece doğru malzemeden yapılmış bir yapı değil, aynı zamanda biyolojik talimatları mimarisine kodlamış, mekanik olarak optimize edilmiş ve ideal olarak hastanın özel ihtiyaçlarına göre tasarlanmış akıllı bir sistemdir.

10.2 Gelecekteki Araştırma Perspektifleri

10.2.1 Çok Fonksiyonlu Malzemeler ve İskeleler

Geleceğin iskeleleri, tek bir görevi yerine getirmek yerine, aynı anda birden fazla biyolojik süreci yönetecektir. Böylelikle çok işlevli akıllı platformlara evrilen doku iskeleleri yalnızca hücrelerin tutunup yerleşeceği bir destek değil aynı zamanda mekanik, fiziksel, biyokimyasal ve immünomodülatör fonksiyonları birleştiren yapıda olacaktır. Örneğin, bir iskele aynı anda osteoindüktif (kemik oluşumunu teşvik eden), anjiyojenik (damar oluşumunu teşvik eden), anti-inflamatuar ve anti-mikrobiyal özelliklere sahip olabilir. Bu, farklı biyoaktif molekülleri ve yüzey modifikasyonlarını tek bir platformda birleştiren karmaşık kompozit tasarımlar gerektirecektir [78].

10.2.2 In-Situ İzleme ve Teşhis

Sensör entegreli akıllı iskeleler, araştırma aşamasından klinik uygulamaya doğru ilerleyecektir. Giyilebilir veya non-invaziv okuma teknolojilerindeki gelişmeler, klinisyenlerin implantın durumunu gerçek zamanlı olarak, sürekli ve ayrıntılı bir şekilde izlemesine olanak tanıyacaktır. Böylelikle Ph, gerilme, mekanik yük gibi değişimlerin eş zamanlı olarak takip edilmesi ve istenmeyen durumların erken teşhis edilebileceği öngörülmektedir. Bu, “rejeneratif süreç yönetimi” olarak adlandırılabilen yeni bir klinik paradigma yaratacak ve sorunlar geri döndürülemez hale gelmeden önce erken müdahaleye olanak sağlayacaktır [72].

10.2.3 Kapalı Döngü ve Rejeneratif Sistemler

Eş zamanlı takibin bir sonraki adımı, otonom yanıttır. Geleceğin en gelişmiş iskeleleri, sadece ortamı algılamakla kalmayıp, aynı zamanda bu bilgilere dayanarak aktif olarak yanıt veren kapalı döngü sistemleri olacaktır. Kapalı döngü sistemler sensör, kontrol algoritması ve tedavi edici aktüatör kombinasyonu ile oluşan sistemlerdir. Örneğin, bir sensörün enfeksiyonun başlangıcını tespit etmesi, iskelenin o bölgeye lokal olarak bir antibiyotik salmasını tetikleyebilir. Veya mekanik gerilmenin yetersiz olduğu tespit edildiğinde, iskele hücre farklılaşmasını teşvik etmek için bir büyüme faktörü salabilir. Bu sistemler, rejenerasyon sürecini akıllı ve otonom bir şekilde yönetecek “vücut içindeki doktorlar” gibi hareket edecektir. Böylelikle sensörler fizyolojik parametreleri algılandıktan sonra otonom sistem ile karar mekanizması çalışır ve buna karşılık bir yanıt gerçekleştirilebilir [79].

11. Sonuç

Doku mühendisliği ve iskele teknolojileri, rejeneratif tıbbın çehresini değiştirme potansiyeline sahiptir. Biyomekanik prensiplerin bu alandaki merkezi rolü yadsınamaz bir gerçektir. İskeleler, basitçe boşluk dolduran pasif yapılar olmaktan çıkıp, hücrelerle karmaşık bir mekanik ve biyolojik diyalog kuran, iyileşme sürecini yönlendiren aktif sofistike mühendislik harikalarına dönüşmüştür. Yapay zekâ, akıllı malzemeler ve ileri üretim tekniklerindeki ilerlemeler, bu alandaki inovasyon hızını daha da artıracaktır. Vaskülarizasyon ve klinik translyasyon gibi önemli zorluklar devam etmekle birlikte bu zorlukları aşmak için geliştirilen çözümler de giderek daha sofistike hale gelmektedir. Nihai hedef, hasarlı veya hastalıklı dokuları inert malzemelerle değiştirmekten, mühendislik ürünü biyolojik ve mekanik rehberlik yoluyla tamamen işlevsel, canlı dokuları gerçekten rejenere etmeye doğru bir geçiş yapmaktır. Bu hedefe ulaşıldığında, doku mühendisliği sadece bir tedavi seçeneği değil, aynı zamanda birçok kronik ve dejeneratif hastalık için bir tedavi standardı haline gelecektir.

Kaynaklar

- [1] Chen, G., Ushida, T., Tateishi, T. (2002). Scaffold design for tissue engineering. *Macromolecular Bioscience*, 2(2), 67–77.
- [2] Fang, J., Niu, H., Lin, T., Wang, X. (2008). Applications of electrospun nanofibers. *Chinese Science Bulletin*, 53(15), 2265–2286.
- [3] Mangani, S., Vetoulas, M., Mineschou, K., Spanopoulos, K., Vivanco, M. D., Piperigkou, Z., Karamanos, N. K. (2025). Design and applications of extracellular matrix scaffolds in tissue engineering and regeneration. *Cells*, 14(14), 1076.
- [4] Liu, Y., Wan, Y., Li, C., Guan, G., Wang, F., Gao, J., Wang, L. (2025). Gradient scaffolds in bone–soft tissue interface engineering: Structural characteristics, fabrication techniques, and emerging trends. *Journal of Orthopaedic Translation*, 50, 333–353.
- [5] Pires, T., Dunlop, J. W., Fernandes, P. R., Castro, A. P. (2022). Challenges in computational fluid dynamics applications for bone tissue engineering. *Proceedings of the Royal Society A*, 478(2257), 20210607.
- [6] Ibrahim, S., D’Andrea, L., Gastaldi, D., Rivolta, M. W., Vena, P. (2024). Machine learning approaches for the design of biomechanically compatible bone tissue engineering scaffolds. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 423, 116842.
- [7] Percival, K. M., Paul, V., Hussein, G. A. (2024). Recent advancements in bone tissue engineering: Integrating smart scaffold technologies and bio-responsive systems for enhanced regeneration. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(11), 6012.
- [8] Huang, D., Li, Z., Li, G., Zhou, F., Wang, G., Ren, X., Su, J. (2025). Biomimetic structural design in 3D-printed scaffolds for bone tissue engineering. *Materials Today Bio*, 26, 101664.
- [9] Zıkşahna, K., Dinçer, Z. Y., Adıyıl, R., Ihlamur, M. (2025). Doku mühendisliğinde biyobozunur iskeleler. *Biruni Sağlık ve Eğitim Bilimleri Dergisi*, 8(1), 34–51.
- [10] Huttmacher, D. W., Tandon, B., Dalton, P. D. (2023). Scaffold design and fabrication. *Tissue engineering* (ss. 355–385). Academic Press.
- [11] Cheng, A., Schwartz, Z., Kahn, A., Li, X., Shao, Z., Sun, M., Ao, Y., Boyan, B.D., Chen, H. (2019). Advances in porous scaffold design for bone and cartilage tissue engineering and regeneration. *Tissue Engineering Part B: Reviews*, 25(1), 14–29.
- [12] Yang, L., Wang, X., Xiong, M., Liu, X., Luo, S., Luo, J., Wang, Y. (2024). Electrospun silk fibroin/fibrin vascular scaffold with superior mechanical

- properties and biocompatibility for applications in tissue engineering. *Scientific Reports*, 14(1), 3942.
- [13] Ding, W. (2016). Opportunities and challenges for biodegradable magnesium alloys as next-generation biomaterials. *Regenerative Biomaterials*, 3(2), 79–86.
- [14] Li, F., Chen, C., Chen, X. (2024). Tremendous advances, multifaceted challenges and feasible future prospects of biodegradable medical polymer materials. *RSC Advances*, 14(44), 32267–32283.
- [15] Zhang, S., Chen, X., Shan, M., Hao, Z., Zhang, X., Meng, L., Zhai, Z., Zhang, L., Liu, X., Wang, X. (2023). Convergence of 3D bioprinting and nanotechnology in tissue engineering scaffolds. *Biomimetics*, 8(1), 94.
- [16] Echeverria Molina, M. I., Malollari, K. G., Komvopoulos, K. (2021). Design challenges in polymeric scaffolds for tissue engineering. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 617141.
- [17] Farjaminejad, S., Farjaminejad, R., Hasani, M., Garcia-Godoy, F., Abdouss, M., Marya, A., Harsoputranto, A., Jamilian, A. (2024). Advances and challenges in polymer-based scaffolds for bone tissue engineering: A path towards personalized regenerative medicine. *Polymers*, 16(23), 3303.
- [18] Tajvar, S., Hadjizadeh, A., Samandari, S. S. (2023). Scaffold degradation in bone tissue engineering: An overview. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 180, 105599.
- [19] Loh, Q. L., Choong, C. (2013). Three-dimensional scaffolds for tissue engineering applications: Role of porosity and pore size. *Tissue Engineering Part B: Reviews*, 19(6), 485–502.
- [20] Shimojo, A. A. M., Rodrigues, I. C. P., Perez, A. G. M., Souto, E. M. B., Gabriel, L. P., Webster, T. (2020). Scaffolds for tissue engineering: A state-of-the-art review concerning types, properties, materials, processing, and characterization. *Racing for the Surface: Antimicrobial and Interface Tissue Engineering*, 647–676.
- [21] Jang, J. W., Min, K. E., Kim, C., Shin, J., Lee, J., Yi, S. (2023). Correction: Review: Scaffold characteristics, fabrication methods, and biomaterials for bone tissue engineering. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 24(5), 887–887.
- [22] Dey, K., Roca, E., Ramorino, G., Sartore, L. (2020). Progress in the mechanical modulation of cell functions in tissue engineering. *Biomaterials Science*, 8(24), 7033–7081.
- [23] Wang, Y., Liu, M., Zhang, W., Liu, H., Jin, F., Mao, S., Han, C., Wang, X. (2024). Mechanical strategies to promote vascularization for tissue engineering and regenerative medicine. *Burns & Trauma*, 12, tkae039.

- [24] Cai, P., Hu, B., Leow, W. R., Wang, X., Loh, X. J., Wu, Y. L., Chen, X. (2018). Biomechano-interactive materials and interfaces. *Advanced Materials*, 30(31), 1800572.
- [25] Tortorella, I., Argentati, C., Emiliani, C., Morena, F., Martino, S. (2022). Biochemical pathways of cellular mechanosensing/mechanotransduction and their role in neurodegenerative diseases pathogenesis. *Cells*, 11(19), 3093.
- [26] Duszyc, K., Viasnoff, V. (2018). Mechanosensing and mechanotransduction at cell–cell junctions. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 10(8), a028761.
- [27] Martino, F., Perestrelo, A. R., Vinarský, V., Pagliari, S., Forte, G. (2018). Cellular mechanotransduction: From tension to function. *Frontiers in Physiology*, 9, 824.
- [28] Bakhshandeh, B., Sorboni, S. G., Ranjbar, N., Deyhimfar, R., Abtahi, M. S., Izady, M., Kazemi, N., Noori, A., Pennisi, C. P. (2023). Mechanotransduction in tissue engineering: Insights into the interaction of stem cells with biomechanical cues. *Experimental Cell Research*, 431(2), 113766.
- [29] Han, P., Gomez, G. A., Duda, G. N., Ivanovski, S., & Poh, P. S. (2023). Scaffold geometry modulation of mechanotransduction and its influence on epigenetics. *Acta Biomaterialia*, 163, 259–274.
- [30] Yi, B., Xu, Q., Liu, W. (2022). An overview of substrate stiffness-guided cellular response and its applications in tissue regeneration. *Bioactive Materials*, 15, 82–102.
- [31] Bianchi, E., Faccendini, A., Del Favero, E., Ricci, C., Caliogna, L., Vigani, B., Pavesi, F.C., Perotti, C., Domingues R.M.A., Gomes, M.E., Rossi, S., Sandri, G. (2022). Topographical and compositional gradient tubular scaffold for bone-to-tendon interface regeneration. *Pharmaceutics*, 14(10), 2153.
- [32] Xia, P., Luo, Y. (2022). Vascularization in tissue engineering: The architectural cues of pores in scaffolds. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 110(5), 1206–1214.
- [33] Zhang, K., Fan, Y., Dunne, N., Li, X. (2018). Effect of microporosity on scaffolds for bone tissue engineering. *Regenerative Biomaterials*, 5(2), 115–124.
- [34] Abbasi, N., Hamlet, S., Love, R., Nguyen, N. (2020). Porous scaffolds for bone regeneration. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 5, 1-9.
- [35] Liu, X., Yu, L., Xiao, A., Sun, W., Wang, H., Wang, X., Zhou, Y., Li, C., Li, J., Wang, Y., Wang, G. (2025). Analytical methods in studying cell force sensing: Principles, current technologies and perspectives. *Regenerative Biomaterials*, 12, rbaf007.

- [36] Kim, S., Uroz, M., Bays, J. L., Chen, C. S. (2021). Harnessing mechanobiology for tissue engineering. *Developmental Cell*, 56(2), 180–191.
- [37] Berniak, K., Ura, D. P., Piórkowski, A., Stachewicz, U. (2024). Cell–material interplay in focal adhesion points. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 16(8), 9944–9955.
- [38] Putra, V. D., Kilian, K. A., Knothe Tate, M. L. (2023). Biomechanical, biophysical and biochemical modulators of cytoskeletal remodelling and emergent stem cell lineage commitment. *Communications Biology*, 6(1), 75.
- [39] Loh, Q. L., Choong, C. (2013). Three-dimensional scaffolds for tissue engineering applications: Role of porosity and pore size. *Tissue Engineering Part B: Reviews*, 19(6), 485–502.
- [40] Olivares, A. L., Lacroix, D. (2012). Computational methods in the modeling of scaffolds for tissue engineering. *Computational modeling in tissue engineering* (ss. 107–126). Springer.
- [41] Anjum, S., Rahman, F., Pandey, P., Arya, D. K., Alam, M., Rajinikanth, P. S., Ao, Q. (2022). Electrospun biomimetic nanofibrous scaffolds: A promising prospect for bone tissue engineering and regenerative medicine. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(16), 9206.
- [42] Mele, E., Tartarini, D., Moroni, L. (2022). Design, modeling and manufacturing of scaffolds to control cell–biomaterial interactions in tissue engineering. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 868362.
- [43] Ege, G. K., Sürmen, H. K., Bektaş, B., Akkuş, N. (2019). 4D baskı teknolojisi ve biyobaskı alanındaki uygulamaları. *4th International Congress on 3D Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry*, 11–14 Nisan, Antalya, Türkiye.
- [44] Ahadian, S., Khademhosseini, A. (2018). Smart scaffolds in tissue regeneration. *Regenerative Biomaterials*, 5(3), 125–128.
- [45] Wang, Z., Ma, D., Liu, J., Xu, S., Qiu, F., Hu, L., Liu, Y., Ke, C., & Ruan, C. (2025). 4D printing polymeric biomaterials for adaptive tissue regeneration. *Bioactive Materials*, 48, 370- 399.
- [46] Richbourg, N., Peppas, N., Sikavitsas, V. (2019). Tuning the biomimetic behavior of scaffolds for regenerative medicine through surface modifications. *Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine*, 13, 1275 - 1293.
- [47] Sturrock, P. A. (1994). *Plasma physics: An introduction to the theory of astrophysical, geophysical and laboratory plasmas*. Cambridge University Press.
- [48] Friedrich, J. (2012). *The plasma chemistry of polymer surfaces: Advanced techniques for surface design*. John Wiley & Sons.

- [49] Sharath Kumar, J., Kumar, R., Verma, R. (2024). Surface modification aspects for improving biomedical properties in implants: A review. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 37(2), 213–241.
- [50] Zhang, Y., Zhang, C., Li, Y., Zhou, L., Dan, N., Min, J., Chen, Y., Wang, Y. (2023). Evolution of biomimetic ECM scaffolds from decellularized tissue matrix for tissue engineering: A comprehensive review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 246, 125672.
- [51] Todd, E. A., Mirsky, N. A., Silva, B. L. G., Shinde, A. R., Arakelians, A. R., Nayak, V. V., Chierici Marcantonio, R.A., Gupta, N., Witek, L., Coelho, P. G. (2024). Functional scaffolds for bone tissue regeneration: A comprehensive review of materials, methods, and future directions. *Journal of Functional Biomaterials*, 15(10), 280.
- [52] Oryan, A., Alidadi, S., Moshiri, A., Maffulli, N. (2014). Bone regenerative medicine: Classic options, novel strategies, and future directions. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, 9(1), 18.
- [53] Zhang, X., Bogdanowicz, D., Erisken, C., Lee, N. M., Lu, H. H. (2012). Biomimetic scaffold design for functional and integrative tendon repair. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, 21(2), 266–277.
- [54] Li, W. J., Mauck, R. L., Cooper, J. A., Yuan, X., Tuan, R. S. (2007). Engineering controllable anisotropy in electrospun biodegradable nanofibrous scaffolds for musculoskeletal tissue engineering. *Journal of Biomechanics*, 40(8), 1686–1693.
- [55] Huang, L., Chen, L., Chen, H., Wang, M., Jin, L., Zhou, S., Gao, L., Li, R., Li, Q., Wang, H., Zhang, C., Wang, J. (2023). Biomimetic scaffolds for tendon tissue regeneration. *Biomimetics*, 8(2), 246.
- [56] Xie, X., Wang, Y., Li, Z., Yang, G., Cheng, G., Qin, S., Wang, H., Zhu, L. (2025). Recent advances in gradient biomimetic scaffolds for tendon–bone interface regeneration. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 13, 1629816.
- [57] Cosgriff-Hernandez, E., Timmins, L. H. (2022). Model-directed design of tissue engineering scaffolds. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 8(11), 4622–4624.
- [58] Bermejillo Barrera, M. D., Franco-Martínez, F., Díaz Lantada, A. (2021). Artificial intelligence-aided design of tissue engineering scaffolds employing virtual tomography and 3D convolutional neural networks. *Materials*, 14(18), 5278.
- [59] Musthafa, H. S. N., Walker, J., Domagala, M. (2024). Computational modelling and simulation of scaffolds for bone tissue engineering. *Computation*, 12(4), 74.

- [60] Wu, C., Wan, B., Entezari, A., Fang, J., Xu, Y., Li, Q. (2024). Machine learning-based design for additive manufacturing in biomedical engineering. *International Journal of Mechanical Sciences*, 266, 108828.
- [61] Roldán, E., Reeves, N. D., Cooper, G., Andrews, K. (2024). Machine learning to mechanically assess 2D and 3D biomimetic electrospun scaffolds for tissue engineering applications: Between predictability and interpretability. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 157, 106630.
- [62] Soufivand, A. A., Abolfathi, N., Hashemi, S. A., Lee, S. J. (2020). Prediction of mechanical behavior of 3D bioprinted tissue-engineered scaffolds using finite element method analysis. *Additive Manufacturing*, 33, 101181.
- [63] Shirzad, M., Chashmi, M. J., Khakzadkelarijani, S., Kang, J., Bodaghi, M., Nam, S. Y. (2025). Machine-learning-assisted design and optimization of auxetic structures: A bioinspired approach to mimic natural tissues. *Advanced Engineering Materials*, 27(20), 2500377.
- [64] Oncu, E., Ayanoglu, K. Y. U., Ciftci, F. (2025). Comparative analysis of deep learning models for predicting biocompatibility in tissue scaffold images. *Computers in Biology and Medicine*, 192, 110281.
- [65] Omigbodun, F. T., Oladapo, B. I. (2025). AI-optimized lattice structures for biomechanics scaffold design. *Biomimetics*, 10(2), 88.
- [66] Novosel, E. C., Kleinhans, C., Kluger, P. J. (2011). Vascularization is the key challenge in tissue engineering. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 63(4–5), 300–311.
- [67] Lovett, M., Lee, K., Edwards, A., Kaplan, D. L. (2009). Vascularization strategies for tissue engineering. *Tissue Engineering Part B: Reviews*, 15(3), 353–370.
- [68] Huang, Q., Hu, K., Xu, C., Chen, Y., Guo, L., Liu, Y., Bian, L., Wen, C., Wang, W., Xu, W., Yang, H. (2025). A bio-inspired screwed small-diameter vascular graft for endothelization and arterial regeneration. *Bioactive Materials*, 53, 253–268.
- [69] Xu, Y., Hu, Y., Liu, C., Yao, H., Liu, B., & Mi, S. (2018). A novel strategy for creating tissue-engineered biomimetic blood vessels using 3D bioprinting technology. *Materials*, 11(9), 1581.
- [70] Zhang, H., Zhou, L., Zhang, W. (2014). Control of scaffold degradation in tissue engineering: A review. *Tissue Engineering Part B: Reviews*, 20(5), 492–502.
- [71] Zhang, Y., Li, T., Zhao, C., Li, J., Huang, R., Zhang, Q., Li, Y., Li, X. (2021). An integrated smart sensor dressing for real-time wound microenvironment monitoring and promoting angiogenesis and wound healing. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 9, 701525.

- [72] Kumar, R., Sporn, K., Prabhakar, P., Paladugu, P., Khanna, A., Ngo, A., Gowda, C., Waisberg, E., Jagadeesan, R., Zaman, Z., Tavakkoli, A. (2025). Next-generation biomaterials for load-bearing tissue interfaces: Sensor-integrated scaffolds and mechanoadaptive constructs for skeletal regeneration. *Journal of Functional Biomaterials*, 16(7), 232.
- [73] Webber, M. J., Khan, O. F., Sydlik, S. A., Tang, B. C., Langer, R. (2015). A perspective on the clinical translation of scaffolds for tissue engineering. *Annals of Biomedical Engineering*, 43(3), 641–656.
- [74] Sekar, M. P., Budharaju, H., Zennifer, A., Sethuraman, S., Vermeulen, N., Sundaramurthi, D., Kalaskar, D. M. (2021). Current standards and ethical landscape of engineered tissues—3D bioprinting perspective. *Journal of Tissue Engineering*, 12, 20417314211027677.
- [75] Shafiee, A., Atala, A. (2017). Tissue engineering: Toward a new era of medicine. *Annual Review of Medicine*, 68(1), 29–40.
- [76] Soggi, M. C., Rodríguez, G., Oliva, E., Fushimi, S., Takabatake, K., Nagatsuka, H., Felice, C.J., Rodríguez, A. P. (2023). Polymeric materials, advances and applications in tissue engineering: A review. *Bioengineering*, 10(2), 218.
- [77] Rajendran, A. K., Sankar, D., Amirthalingam, S., Kim, H. D., Rangasamy, J., Hwang, N. S. (2023). Trends in mechanobiology-guided tissue engineering and tools to study cell–substrate interactions: A brief review. *Biomaterials Research*, 27(1), 55.
- [78] Muzzio, N., Moya, S., Romero, G. (2021). Multifunctional scaffolds and synergistic strategies in tissue engineering and regenerative medicine. *Pharmaceutics*, 13(6), 792.
- [79] Leng, Y., Sun, R. (2025). Multifunctional biomedical devices with closed-loop systems for precision therapy. *Advanced Healthcare Materials*, 2500860.

BÖLÜM 39

Depo Yönetiminde Bilişim Teknolojileri

Aycan Kama¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi, 0000-0001-5008-9072

1. GİRİŞ

Depo yönetiminde bilişim teknolojileri, temel Depo Yönetim Sistemlerinden başlayarak Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Endüstri 4.0 uygulamalarını kapsayan ileri düzey çözümlere uzanan geniş bir yelpazede ele alınmaktadır. Bu kapsamda RFID (Radyo Frekansı ile Tanımlama), otonom mobil robotlar, artırılmış gerçeklik, blok zinciri ve hesaplamalı zekâ gibi teknolojiler, depo operasyonlarının dijital dönüşümünde önemli bir rol üstlenmektedir. Söz konusu teknolojiler; stok yönetimi ve izlenebilirlik, sipariş toplama ve yerine getirme ile gerçek zamanlı izleme gibi temel depo fonksiyonlarını desteklemektedir. Nicel uygulama sonuçlarına dayanan ampirik bulgular, bu teknolojilerin operasyonel performans üzerinde kayda değer iyileşmeler sağladığını ortaya koymaktadır.

Bununla birlikte, söz konusu teknolojilerin uygulanması; yüksek yaşam döngüsü maliyetleri, mevcut sistemlerle entegrasyon zorlukları, mevcut tesislerdeki altyapı yetersizlikleri ve beceri eksiklikleri ile yetersiz eğitim gibi örgütsel kısıtlar nedeniyle önemli engellerle karşı karşıyadır. Elde edilen bulgular, teknoloji seçimi ve uygulama başarısının, evrensel olarak en iyi çözüm anlayışından ziyade, deponun karmaşıklık düzeyi ve örgütsel bağlamı tarafından belirlendiğini göstermektedir. Ürün çeşitliliğinin sınırlı olduğu, nispeten basit depo yapılarında standart Depo Yönetim Sistemi çözümleri yeterli performans sağlarken; yüksek stok tutma birimi (SKU) sayısı, çok sayıda sipariş satırı ve değişken ürün karması ile karakterize edilen karmaşık depo ortamlarında, özel olarak tasarlanmış sistemler veya ileri düzey IoT entegrasyonları anlamlı performans artışları elde edilmesi açısından gerekli hale gelmektedir.

Ayrıca, örgüt büyüklüğünün teknoloji yatırımlarından elde edilen faydalar üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Küçük ve orta ölçekli işletmeler, kaynak kısıtları, sınırlı bakım bütçeleri ve yetersiz destekleyici altyapılar nedeniyle, aynı teknolojik sistemleri uygulamalarına rağmen bu yatırımlardan beklenen değeri tam olarak elde edememektedir. Buna karşılık, yeterli finansal kaynaklara ve nitelikli insan kaynağına sahip büyük ölçekli işletmeler, kapsamlı teknoloji entegrasyonları sayesinde maksimum fayda sağlayabilmektedir. Bu bağlamda, küçük ölçekli işletmelerin mevcut kaynakları doğrultusunda kritik operasyonel darboğazlara odaklanan, hedefli ve aşamalı teknoloji yatırımlarını önceliklendirmeleri önerilmektedir.

2. Depo Yönetimi

Harb vd. (2016), depo yönetim sistemlerini, işletmelerin maliyetlerini azaltmalarına ve operasyonel süreçlerini iyileştirmelerine yardımcı olan “depolama ve dağıtım problemlerine yönelik çözümler” olarak tanımlamaktadır. Söz konusu çalışma, Depo Yönetim Sistemi uygulamasının operasyonel etkinliği

artırdığını ve önemli ölçüde işletme maliyet tasarrufu sağladığını ortaya koymaktadır.

Depo yönetiminin temel unsurları şu şekilde özetlenebilir:

Stok Kontrolü: Pooja vd. (2023), üretim için gerekli olan tüm hammaddelerin yeterli stok seviyelerinde bulundurulmasını sağlamak amacıyla uygun stok kontrol mekanizmalarının hayati öneme sahip olduğunu ifade etmektedir. Bu durum, etkili depo yönetiminin temel işlevlerinden birinin doğru ve hassas stok kontrolü olduğunu ortaya koymaktadır.

Operasyonel Verimlilik: Zengwa vd. (2016), Kurumsal Kaynak Planlama (Enterprise Resource Planning – ERP) sistemlerinin bilişim teknolojileri aracılığıyla tüm iş süreçlerini bütünleştirmeyi başardığını; bu sayede işlem süreçlerinin iyileştirildiğini ve farklı sistem kullanıcıları arasında bilgi paylaşımının desteklendiğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, tam anlamıyla etkin ve verimli bir stok yönetim sistemi oluşturulabilmesi için bazı ilave geliştirmelere hâlen ihtiyaç duyulduğu tespit edilmiştir.

Tedarik Zinciri ile Entegrasyon: Ulu (2025), mobil depo kavramları ve bunların daha geniş stok yönetim sistemleriyle entegrasyonuna atıfta bulunarak, depo yönetiminin tedarik zinciri koordinasyonunun ayrılmaz bir parçası olduğunu ifade etmektedir.

Bununla birlikte, incelenen kaynakların depo yönetimini bağımsız bir disiplin olarak kapsamlı biçimde tanımlamaktan ziyade, daha çok teknolojik çözümler üzerinden ele aldığı görülmektedir. Mevcut bulgular genel olarak depo yönetiminin; stok kontrolü, operasyonel optimizasyon, maliyetlerin azaltılması ve tedarik zinciri süreçleriyle bütünleşme gibi unsurları kapsayan çok boyutlu bir yönetim alanı olduğunu göstermektedir.

3. Depo Uygulamaları

Literatür incelemesi sonucunda depo yönetiminde kullanılan bilişim teknolojilerinin oluşturulmuştur. Bu inceleme sonucunda, Depo Yönetim Sistemleri, Kurumsal Kaynak Planlama (ERP) ve Taşıma Yönetim Sistemleri (TMS) gibi özgül sistemleri; RFID, sensörler, QR kodları ve tarayıcılar gibi Nesnelerin İnterneti (IoT) tabanlı teknolojileri; blok zinciri, bulut bilişim, yapay zekâ ve makine öğrenmesi gibi Endüstri 4.0 bileşenlerini; mobil cihazlar ve otomatik ekipmanlar başta olmak üzere donanım unsurlarını; çeşitli yazılım uygulamaları ve platformları ile entegrasyon teknolojileri ve iletişim sistemlerini kapsamaktadır. Ayrıca, her bir teknolojinin çalışmalarda sunulan özellikleri, işlevleri ve yeteneklerine ilişkin açıklamaların ayrıntı düzeyi de dikkate alınmıştır.

Bunun yanı sıra, depo uygulamaları başlığı altında söz konusu teknolojilerin hangi depo süreç ve fonksiyonlarını desteklediği analiz edilmiştir. Bu doğrultuda teknolojilerin; stok yönetimi ve izlenebilirlik, sipariş toplama ve yerine getirme, mal kabul ve raflama işlemleri, sevkiyat ve dağıtım, yerleşim planı optimizasyonu ve alan yönetimi, iş gücü yönetimi ve verimlilik, kalite kontrol ve doğruluk, öngörücü bakım ile gerçek zamanlı izleme ve görünürlük gibi temel depo faaliyetlerine nasıl uygulandığı belirlenmiştir. Her bir teknoloji için ilgili süreçlerdeki uygulama biçimleri, operasyonel katkıları ve performans üzerindeki etkileri, çalışmalarda sunulan bulgular çerçevesinde ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

Depo yönetiminin faydaları kapsamında, literatürde raporlanan tüm kazanımlar ve performans iyileştirmeleri sistematik bir yaklaşımla değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda; operasyonel verimlilik artışları (mevcut olduğunda nicel göstergelerle birlikte), maliyet azaltımları (iş gücü, stok ve operasyonel maliyetler türlerine göre ayrıştırılarak), doğruluk düzeyindeki iyileşmeler (stok ve sipariş yerine getirme doğruluğu), zaman tasarrufu ve işlem hızındaki artışlar, müşteri hizmetleri performansındaki gelişmeler, rekabet avantajı kazanımları, veri kalitesi ve operasyonel görünürlükteki artışlar, israfın azaltılması ile tedarik zinciri genelinde entegrasyondan kaynaklanan faydalar kapsamlı biçimde analiz edilmiştir. Ayrıca, söz konusu faydaların nicel ölçütlere dayalı mı yoksa nitel değerlendirmeler şeklinde mi sunulduğu ve raporlanan özgül performans göstergeleri ile metrikler de dikkate alınmıştır.

Literatür incelendiğinde, uygulama engelleri kapsamında çalışmalarda raporlanan zorluklar, engeller ve sınırlılıklar ele alınmıştır. Bu doğrultuda; finansal engeller (yüksek yatırım maliyetleri, yatırımın geri dönüşüne ilişkin belirsizlikler ve bütçe kısıtları), teknik zorluklar (sistem entegrasyonuna ilişkin sorunlar ve teknolojik karmaşıklık), örgütsel engeller (beceri eksiklikleri, değişime karşı direnç ve eğitim gereksinimleri), altyapı sınırlılıkları (fiziksel yerleşim düzeni ve mevcut sistemlerden kaynaklanan kısıtlar), güvenlik ve risk unsurları, kaynak kısıtları (zaman, insan kaynağı ve uzmanlık yetersizlikleri), sektöre özgü zorluklar ile uygulama sürecine ve zaman çizelgesine ilişkin sorunlar kapsamlı biçimde analiz edilmiştir. Ayrıca, söz konusu engellerin şiddet düzeyi ile çalışmalarda belirtilmiş olması hâlinde, bu engellerin nasıl ele alındığına veya azaltılmasına yönelik yaklaşımlar da değerlendirmeye dâhil edilmiştir.

4. Temel Depo Yönetim Sistemleri

Depo Yönetim Sistemleri tüm çalışmalarda temel teknoloji olarak yer almış, ancak uygulama yaklaşımları önemli ölçüde farklılık göstermiştir. Standart ve özel depo yönetim sistemleri yapılandırmaları, kritik bir stratejik karar olarak öne çıkmaktadır; standart sistemler maliyet avantajı ve daha kısa uygulama süreleri

sağlarken, özel çözümler, standart iş akışlarının performansı düşürebileceği karmaşık depo ortamlarını hedeflemektedir.

Depo yönetim sistemleri fonksiyonları birden fazla operasyonel alanı kapsamaktadır. Stok yönetimi ve izlenebilirlik açısından sistemler, mal giriş ve çıkışlarının ayrıntılı kontrolünü sağlamaktadır veya sağlayacağı öngörülmektedir; depo kapasitesi ve depolanan birimlerin kayıtlarını tutmakta ve IoT destekli uygulamalarda stok doğruluğunu artıracakları öngörülmektedir. Sipariş toplama ve yerine getirme süreçleri, sistemlerin planlama ve kontrol yeteneklerinden faydalanmakta; günlük işlenen sipariş satırlarını yönetmekte ve siparişlerin işleme süresini hızlandırmaktadır veya hızlandıracakları öngörülmektedir. Mal kabul ve raflama operasyonları, Depo Yönetim Sistemleri aracılığıyla mal akışının kabulden sevkiyata kadar kontrol edilmesiyle verimlilik kazandırmakta veya kazandıracakları öngörülmektedir; sevkiyat ve dağıtım süreçleri ise çoklu taşıyıcı gönderim araç setlerinden yararlanmakta veya yararlanacakları öngörülmektedir.

5. Depo Yönetiminde Teknoloji Uygulamaları

Depo yönetiminde kullanılan teknolojiler, farklı kategoriler altında sınıflandırılmakta ve her bir teknoloji belirli uygulama alanlarına hizmet etmektedir. Temel Depo Yönetim Sistemleri, standart veya özel yapılandırmalarıyla stok yönetimi, sipariş toplama ve mal kabul/sevkiyat işlemlerinde kullanılmakta olduğu gibi değerlendirilmektedir. Bu sistemler, mal akışını kontrol etme, depo kapasitesini yönetme ve günlük işlenen sipariş satırlarını takip etme gibi önemli operasyonel yetenekler sunmakta olduğu gibi gösterilmektedir.

IoT tabanlı sistemler, depo yönetimi yeteneklerinde evrimsel bir ilerleme sağlamaktadır gibi değerlendirilmektedir. RFID teknolojisi, başlıca tanımlama ve izleme mekanizması olarak öne çıkmakta ve depolara giren ve çıkan ürünlerin akışını yönetmekte, stokların gerçek zamanlı görünürlüğünü sağlamaktadır gibi ifade edilmektedir. Bu entegrasyon, basit izlemenin ötesine geçerek, RFID sistemlerinin otomatik tanımlama için veri toplamasını ve stokların izlenebilirliğini mümkün kılmasını sağlamaktadır gibi gösterilmektedir. QR kodları ve tarayıcılar, stok yönetiminde RFID'yi desteklemekte, veri yakalama ve tanımlama işlevlerini artırmakta olduğu gibi belirtilmektedir. Kablosuz sensörler ise depo içi faaliyetlerin izlenmesine olanak tanımakta ve çevresel sensörleme ile gerçek zamanlı bilgi sağlamaktadır gibi ifade edilmektedir. Kablosuz sensör ağları, bu bileşenleri entegre ederek RFID, ERP sistemleri ve bulut bilişim altyapısı arasında bağlantı sağlamakta olduğu gibi değerlendirilmektedir.

Endüstri 4.0 kapsamında geliştirilen teknolojiler de depo operasyonlarını optimize etmekte olduğu gibi gösterilmektedir. Otonom mobil robotlar, sipariş toplama süreçlerini desteklemekte ve ağır stok işlerinde hareketliliği artırarak ergonomik destek sağlamaktadır. Artırılmış gerçeklik uygulamaları, ürünlerin yerlerini bulmada ve sevkiyat kutularının seçimi ile paketleme yöntemlerinde kullanıcıya rehberlik etmekte, uzaktan çalışma ortamları için görselleştirme teknolojisi sunmaktadır. Hesaplamalı zekâ teknikleri, veri kümelenmesi, makine öğrenmesi ve bulanık çıkarım sistemleri yoluyla sipariş toplama süreçlerini optimize etmekte; karar destek sistemleri ise IoT platformlarından sağlanan verileri kullanarak matematiksel modellerle stratejik karar almayı desteklemekte ve insan hatasını azaltmaktadır. Bulut bilişim ve blok zinciri teknolojileri, veri yönetimi ve güvenlik ihtiyaçlarını karşılamakta; bulut platformları depolama ve kaynaklara uzaktan erişim sağlamak ve gerçek zamanlı veri senkronizasyonu imkânı sunmakta olduğu gibi değerlendirilmektedir. Blok zinciri, dağıtık defter yetenekleri ile güvenli işlem kaydı sağlamak ve karmaşık tedarik zinciri ağlarında veri bütünlüğü sorunlarını çözmekte olduğu düşünülmektedir.

Teknoloji uygulamalarının operasyonel performansa etkileri de belirgin şekilde gözlenmekte olduğu düşünülmektedir. Zaman açısından kritik süreçlerde önemli verimlilik artışları sağlandığı, sipariş toplama ve mal kabul süreçlerinin daha hızlı ve doğru yürütüldüğü düşünülmektedir. Süreç bazlı iyileştirmeler, teknolojinin depo fonksiyonları üzerindeki farklı etkilerini göstermekte olduğu düşünülmektedir. Sipariş toplama sürecinde arama zamanının optimize edilebildiği, teknoloji entegrasyonunun daha hızlı ve doğru teslimatı mümkün kıldığı ve operasyonel mükemmeliyet yoluyla rekabet avantajlarını desteklediği ifade edilmektedir.

Stok ve sipariş doğruluğu açısından da iyileşmeler sağlandığı düşünülmektedir. IoT tabanlı sistemlerin, stok ve sipariş doğruluğunu artırdığı, sipariş karşılama oranlarını iyileştirdiği ve stok tükenmeleri ile eksik teslimatları azalttığı belirtilmektedir. RFID ve barkod tarayıcıların hata risklerini azalttığı ve stok kontrolü için gereken süreyi kısalttığı, ürün yanlış tanımlamalarının azaltılmasının ise müşteri memnuniyetini doğrudan etkileyen kritik hata kaynaklarını ortadan kaldırdığı düşünülmektedir.

6. Literatür İncelemesi

Faber vd. (2002) tarafından gerçekleştirilen çalışma, Depo Yönetim Sistemi planlama ve kontrol yapıları üzerine odaklanan keşifsel bir saha çalışmasıdır; çalışmanın coğrafi kapsamı belirtilmemiş olup, yakın zamanda Depo Yönetim Sistemi uygulamaya başlamış depolar incelenmiştir. Andelkovic vd. (2018) ise Sırbistan'daki 34 şirketi (21 KOBİ, 13 büyük ölçekli) kapsayan ampirik bir anket

alışması yürütmüş ve özellikle sipariş toplama süreçlerinde Depo Yönetim Sistemi kullanımını araştırmıştır.

Lee vd. (2018), RFID tabanlı IoT Depo Yönetim Sistemi uygulamalarını ele alan bir vaka çalışması yapmıştır; coğrafi kapsam belirtilmemiş olup, tek bir şirket rneği üzerinden analiz gerçekleştirilmiştir.

Tikwayo vd. (2023) tarafından yapılan sistematik literatür taraması, küresel ölçekte, ağırlıklı olarak Asya'ya odaklanarak 2019–2022 yılları arasında gerçekleştirilen 33 vaka çalışmasını incelemiş ve Industry 4.0 teknolojilerinin depolama süreçlerine etkilerini değerlendirmiştir.

Harb vd. (2016) hem vaka çalışması hem de literatür taraması yaklaşımını kullanarak Depo Yönetim Sistemi uygulamalarını Lübnan ve ABD'deki iki şirkette analiz etmiştir. Min vd. (2006) ise ABD'de seçilmiş şirketlerde Depo Yönetim Sistemi uygulamalarını inceleyen keşifsel bir çalışma yrtmştir.

Perera vd. (2023) global ölçekli bir sistematik literatür taraması yapmış, yayımlanan makaleleri değerlendirerek IoT teknolojilerinin depo yönetimine etkilerini incelemiştir. Son olarak, Ali vd. (2024) tarafından gerçekleştirilen alışma, RFID ve bulut tabanlı IoT Depo Yönetim Sistemi uygulamalarını ele alan bir sistem geliştirme çalışmasıdır; çalışmanın coğrafi kapsamı belirtilmemiştir.

SONUÇ

Depo yönetiminde teknolojik uygulamalar, manuel ve hata yapmaya açık süreçlerden otomatik, veri odaklı operasyonlara doğru bir paradigma değişimini temsil etmektedir. ERP sistemleri, IoT sensörleri, RFID teknolojisi ve yapay zekânın birleşimi, doğruluk, verimlilik ve maliyet etkinliğinde ölçülebilir iyileşmeler sağlayan entegre platformlar oluşurmaktadır. Bu teknolojiler, depo yönetimini reaktif bir operasyonel işlev olmaktan çıkararak stratejik bir rekabet avantajına dönüştürmekte; tüm tedarik zinciri ekosistemi genelinde gerçek zamanlı görünürlük, öngörülebilirlik ve optimize edilmiş kaynak kullanımı imkânı sağlamaktadır.

KAYNAKÇA

- Ali, A. A., Rashid, R. A., Abdikadir, N. M., Mohamed, A. A., & Ahmed, M. M. (2024, September). IoT Based Warehouse Management System Leveraging On RFID and Cloud Platform Technologies. In *2024 IEEE International Conference on Advanced Telecommunication and Networking Technologies (ATNT)* (Vol. 1, pp. 1-4). IEEE.
- Andelkovic, A., & Radosavljevic, M. (2018). Improving order-picking process through implementation of warehouse management system. *Strategic Management-International Journal of Strategic Management and Decision Support Systems in Strategic Management*, 23(1).
- Faber, N., de Koster, R. M. B., & van de Velde, S. L. (2002). Linking warehouse complexity to warehouse planning and control structure: An exploratory study of the use of warehouse management information systems. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 32(5), 381-395.
- Harb, A., Kassem, A., Chartouni, M. A., & Chaaya, L. B. (2016). Effects of warehouse management and engineering system on cost reduction and operations improvement. In *2016 Sixth International Conference on Digital Information Processing and Communications (ICDIPC)* (pp. 8-12). IEEE.
- Lee, C. K., Lv, Y., Ng, K. K., Ho, W., & Choy, K. L. (2018). Design and application of Internet of things-based warehouse management system for smart logistics. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2753-2768.
- Min, H. (2006). The applications of warehouse management systems: an exploratory study. *International Journal of Logistics: Research and Applications*, 9(2), 111-126.
- Perera, S., Pinto, A., Sewmini, H., Ulugalathenne, A., Thelijagoda, S., & Karunarathna, N. (2023). Influence of IoT on Warehouse Management Performance in the Global Context: A Critical Literature Review.
- Pooja, G., Saravanan, S. N., Nivetha, S. R., Abirami, S., Priyadharshini, H., & Ramani, S. (2023). Review on Effect of IoT in Inventory Management System. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 11, 4100-4112.
- Tikwayo, L. N., & Mathaba, T. N. (2023). Applications of industry 4.0 technologies in warehouse management: A systematic literature review. *Logistics*, 7(2), 24.
- Ulu, E. E. (2025). Inventory Management Systems in the Construction Trade. *Universal Library of Business and Economics*, 2(2).
- Zengwa, O., & Choga, F. (2016). The role of information & communication technology (ICT) In Company Inventory Management in Zimbabwe: 2011-2013. *IOSR Journal of Business and Management*, 18(1), 56-60.

BÖLÜM 40

Taş Mastik Asfalt Karışımlarda Bitüm Modifikasyonu

Hande Varol Morova¹

¹ Arş. Gör. Dr., Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, ORCID: 0000-0002-3481-9925

1. GİRİŞ

Taş mastik asfalt (TMA), kesikli gradasyona sahip bir sıcak karışım asfalt türü olup dünya genelinde giderek yaygınlaşmaktadır. İlk olarak 1960'lı yıllarda Almanya'da geliştirilen TMA kısa sürede yaygın kullanım alanı bulmuştur. TMA karışımlar; yüksek tekerlek izi direnci, uzun ömür, yüksek dayanım ve gürültü kirliliğini azaltma gibi çeşitli avantajlara sahiptir. Bununla birlikte, bağlayıcının süzülme riski ve nispeten yüksek ilk maliyetleri ise dezavantajları arasında yer almaktadır. TMA karışımlardaki yüksek bitüm içeriği nedeniyle, bitümün karışımdan süzülmesini önlemek için stabilizasyon gerekmektedir. Bu stabilizasyon ise genellikle karışıma lifler veya polimer esaslı modifiyerler ilave edilerek sağlanmaktadır (Nejad vd., 2010; Ahmadinia vd., 2011).

Yol kaplamalarında TMA karışımların kullanımıyla, daha yüksek tekerlek izi direnci ve uzun süreli dayanıklılık sağlandığı ortaya konulmuştur. TMA karışımlar; yüksek iri agrega oranı, genellikle %5.5-7 aralığında değişen bitüm içeriği ve yüksek miktarda mineral filler içerecek şekilde tasarlanmaktadır (Al-Hadidy vd., 2011). Karayolu Teknik Şartnamesi'ne (KTŞ, 2013) göre TMA karışımlarda bitüm süzülmesini engellemek ve hedeflenen performans kriterlerini sağlamak amacıyla selüloz veya mineral elyaf kullanımı ile birlikte polimer bitüm modifikasyonu uygulanmaktadır. Bu doğrultuda, TMA karışımlarda bitüm modifikasyonu, karışım performansının sağlanması açısından temel bir tasarım bileşeni olarak değerlendirilmektedir.

2. TAŞ MASTİK ASFALT

TMA, ilk olarak asfalt karışımlarda çivili lastiklerin neden olduğu aşınmaya karşı dayanımı artırmak amacıyla geliştirilmiştir. Bunun yanı sıra, ağır trafik yüklerinin tekrarlı etkisi ve araç lastiklerinden kaynaklanan yüksek basınç altında oluşan plastik deformasyona karşı karışıma yüksek bir direnç sağlamaktadır. Ayrıca TMA'nın pürüzlü yüzey yapısı, kaplama üzerindeki asfalt çimentosu tabakasının yoğun ve ağır trafik etkisiyle aşınması durumunda bile yeterli sürtünmenin korunmasına olanak tanımaktadır (Ahmadinia vd., 2011).

TMA'nın tercih edilmesini sağlayan temel üstünlükler; kaplamanın daha uzun süre hizmet verebilmesi, kalıcı deformasyonlara ve aşınmaya karşı yüksek performans göstermesi, nem etkilerine karşı dayanıklı olması, yaşlanma sürecinin daha yavaş ilerlemesi ve trafik kaynaklı gürültüyü azaltabilmesidir (Öner ve Özdaş, 2022).

TMA kaplama tasarımında karışım, ağırlıkça yaklaşık %70-80 oranında iri agrega, %8-12 filler, %5-7 bağlayıcı ve %0.3-0.5 lif içermektedir (Xavier vd., 2018). Yüksek iri agrega oranı, agregalar arasında güçlü bir temas oluşturarak tekerlek izi oluşumuna karşı direnç sağlarken; yüksek bağlayıcı içeriği agrega danelerini çevreleyen kalın bağlayıcı filmi sayesinde kaplamanın dayanıklılığını artırmaktadır. Ancak bu düzeyde yüksek bağlayıcı içeriğinin süzülmeye neden

olmaması için karışıma selüloz elyaf veya mineral elyaf eklenmektedir. Öte yandan, tekerlek izi direncini artırıcı özellikleri nedeniyle polimer modifiye asfalt bağlayıcılar TMA karışımların üretiminde tercih edilmekte; bu bağlayıcıların sahip olduğu yüksek viskozite, bağlayıcı süzülmesinin azaltılmasına da önemli ölçüde katkı sağlamaktadır (Putman ve Amirkhanian 2004; Öner ve Özdaş, 2022).

3. BİTÜM MODİFİKASYONU

Karayolu ulaşımı, hemen her noktaya erişim imkânı sağlaması nedeniyle hem yolcu hem de yük taşımacılığında dünya genelinde en yaygın kullanılan ulaşım sistemi olma özelliğini korumaktadır. Bununla birlikte, dünya nüfusundaki artışa paralel olarak ulaşım talebin yükselmesi, karayolu kaplamalarının daha kısa sürede bozulmasına yol açmaktadır. Bu bozulmaların önlenmesinde temel yaklaşım ise yol yapımında kullanılan malzeme özelliklerinin geliştirilmesine yöneliktir (Tayabji vd., 2010; Köfteci vd., 2014).

Bitümün, yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumuna karşı koyabilecek yeterli rijitliğe sahip olması; buna karşılık düşük sıcaklıklarda ise termal çatlamaya direnç gösterebilmesi için yeterince yumuşak ve elastik bir davranış sergilemesi gerekmektedir (Lesueur, 2009). Ancak saf bitümlerin büyük bir bölümü bu özelliklerin tamamını aynı anda sağlayamamaktadır. Bunun yanı sıra, bazı uygulamalarda saf bitümler yeterli performans sergileyememekte, düşük sıcaklıklarda gevrekleşirken yüksek sıcaklıklarda ise kolaylıkla yumuşamaktadır. Saf bitümün sınırlı sıcaklık aralığında performans gösterebilmesi başlıca dezavantajlarından biridir. Ayrıca, trafik hızlarının ve yüklerinin önemli ölçüde artması ile plansız aşırı yüklemeler, asfalt kaplamaların hizmet ömrünü ciddi biçimde kısaltmakta; bakım maliyetlerini artırmaktadır. Bu nedenlerle, saf bitümün performans özelliklerinin geliştirilmesine yönelik olarak polimerler, kimyasal modifiyerler gibi çok sayıda katkı maddesi bitüm modifikasyonunda uygulanmış ve bu uygulamalardan önemli ölçüde başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Porto vd., 2019).

Asfalt karışımların polimerlerle modifikasyonu, esnek kaplama tasarımında kaplamanın hizmet ömrünü artırmak veya kaplama ile temel tabakası kalınlıklarının azaltılmasına olanak tanıyan etkili yöntemlerden biri olarak değerlendirilmektedir (Al-Hadidy ve Tan, 2009). Polimer katkılar, bitümün rijitliğini artırmakta ve sıcaklık hassasiyetini iyileştirmekte; bu sayede özellikle sıcak iklim koşullarında sıkça karşılaşılan tekerlek izi oluşumuna karşı karışımın direncini yükseltmektedir. Polimer modifiye bağlayıcıların öne çıkan özellikleri arasında gelişmiş aderans ve kohezyon kabiliyeti de yer almaktadır. Bu özellikler, asfalt karışımların mekanik performansını ve dayanıklılığını olumlu yönde etkilemektedir (Awwad ve Shbeeb, 2007; Ahmadinia vd., 2011).

4. TMA KARIŞIMLARDA BİTÜM MODİFİKASYONU

TMA karışımların yüksek bağlayıcı içeriği ve boşluklu yapısı, kaplamanın performansını etkileyen önemli etkenlerdendir. Bu nedenle, artan trafik yükleri ve çevresel koşullar altında karışımların mekanik özelliklerini iyileştirmek ve dayanımını artırmak amacıyla bitüm modifikasyonunda farklı katkı maddelerinin kullanımı önem kazanmıştır. Bu kapsamda, bitüm modifikasyonunun TMA karışımlarının performans özelliklerine etkisini inceleyen çalışmalar literatürde yer almaktadır.

TMA karışımlarda bitüm modifikasyonu amacıyla, bağlayıcının mekanik ve reolojik özelliklerini iyileştirmek üzere farklı polimer türleri kullanılmaktadır. Bu kapsamda yapılan çalışmalardan biri olan Ahmadinia vd. (2011), TMA karışımlarda atık plastik şişelerden elde edilen polietilen tereftalatın (PET) kullanımının etkisini incelemiştir. Çalışmada, farklı oranlarda PET (%0, %2, %4, %6, %8 ve %10) içeren TMA karışımların hacimsel ve mekanik özellikleri laboratuvar deneyleriyle değerlendirilmiş; en uygun PET oranının bitüm ağırlığının %6'sı olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar istatistiksel olarak analiz edilmiş ve PET ilavesinin TMA karışımların mühendislik özellikleri üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu rapor edilmiştir.

Geri dönüştürülmüş PVC atıklarının TMA karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkisini inceleyen Fakhri vd. (2022) çalışmada, PVC'leri bitüm ağırlığının %2, %3.5 ve %5'i oranlarında kullanmış; statik sünme, dolaylı çekme dayanımı ve yarım dairesel eğilme gibi çeşitli deneyler uygulanmıştır. Sonuçlar, geri dönüştürülmüş PVC ilavesinin TMA karışımların dolaylı çekme dayanımını, nem direncini, tekerlek izi direncini ve sünme rijitliğini artırdığını göstermiştir.

Polimer bitüm modifikasyonu kapsamında atık lastiklerden elde edilen kırılmış kauçuk gibi kauçuk esaslı elastomer katkılar da bitüm modifikasyonunda kullanılmaktadır. Kırılmış kauçuk ve benzeri atık kökenli katkıların TMA karışımlardaki performans etkileri literatürde çeşitli çalışmalarla incelenmiştir. Mashaan vd. (2013), kaplama bozulmalarını önlemek amacıyla TMA karışımlarda kırılmış lastik kauçuğu (CRM) kullanımının etkisini incelemişlerdir. Çalışmada saf bitüm, bitüm ağırlığına göre %6, %12, %16 ve %20 oranlarında CRM ile modifiye edilmiştir. Deneyler sonucunda, en uygun CRM oranının bitüm ağırlığının %12'si olduğu ve bu oranın maksimum stabiliteyi sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca, CRM içeren modifiye TMA karışımların rezilyans modülü (Mr) değerlerinin, modifiye edilmemiş karışımlara kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Kök vd. (2016) yaptıkları çalışmada, atık lastiklerden elde edilen kırılmış kauçuk (CR) ve parafin ile modifiye edilmiş bitüm kullanılarak üretilen TMA karışımların performans özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada stabilite, rijitlik, yorulma, kalıcı deformasyon ve neme hasarına karşı dirençleri değerlendirilmiş; CR ile modifiye edilen karışımların daha elastik davranış sergilediği belirlenmiştir. Ayrıca %10 CR ve %3 parafinin birlikte kullanıldığı karışımın,

kontrol karışımına kıyasla neme karşı hassasiyet ve yorulma direnci açısından daha iyi sonuçlar verdiği rapor edilmiştir.

Šernas vd. (2023) çalışmalarında, CR'nin tek başına ve SBS polimeri ile birlikte kullanımının bitüm özellikleri ve asfalt karışımlarının tekerlek izi direnci üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneyisel sonuçlar, %2 oranında CR ilavesinin gerekli SBS miktarını yarıya indirebildiğini göstermiştir. Ayrıca, %4 CR ile modifiye edilmiş bitüm ile %2 CR ve %2 SBS içeren bitümün tekerlek izi direnci açısından eşdeğer performans sergilediği belirlenmiştir.

Morea vd. (2023), geleneksel selüloz lifli TMA'ya alternatif olarak iki farklı TMA karışımını ele almışlardır. Bu kapsamda cam makro lif içeren TMA karışımlar ile kullanım ömrünü tamamlamış lastiklerden elde edilen CR ile modifiye edilmiş yüksek viskoziteli bitüm kullanılarak liffsiz üretilen TMA karışımlar değerlendirilmiştir. Karışımların performansı tekerlek izi direnci, çatlak direnci, dinamik modül ve nem hasarı açısından incelenmiştir. Sonuçlar, lif kullanılmadan üretilen yüksek viskoziteli CR bağlayıcılı TMA karışımların, özellikle bitüm süzülmesi başta olmak üzere hacimsel gereklilikleri sağladığını göstermiştir. Ayrıca hem CR bağlayıcılı hem de cam makro lif ilaveli TMA karışımların dinamik modül davranışında iyileşme sağladığı belirtilmiştir.

TMA karışımlarda bitüm modifikasyonu kapsamında polimer esaslı katkıların yanı sıra nano ölçekli malzemelerin kullanımı da literatürde araştırılmaktadır. Bu bağlamda Kordi ve Shafabakhsh (2017), farklı oranlarda nano Fe_2O_3 ilavesinin TMA karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, nano Fe_2O_3 kullanımıyla karışımların rijitlik modülünün arttığı, yorulma dayanımının iyileştiği ve tekerlek izi oluşumuna karşı direncin kabul edilebilir seviyede geliştirildiği rapor edilmiştir. Sadeghnejad ve Shafabakhsh (2017), nano SiO_2 ve nano TiO_2 ilavesinin TMA karışımların mekanik davranışı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, saf bitüm; bitüm ağırlığına göre %0, %0.3, %0.6, %0.9 ve %1.2 oranlarında nano SiO_2 ve nano TiO_2 ile modifiye edilmiştir. TMA karışımların performansı tekerlek izi, dolaylı çekme rijitlik modülü gibi deneyler ile değerlendirilmiş; sonuçlar, nanomalzeme katkısının TMA karışımların mekanik davranışını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir.

TMA karışımların performansını iyileştirmek amacıyla nanosilikanın bitüm modifiyeri olarak kullanımını inceleyen Arshad vd. (2019) çalışmada saf bitümü, ağırlığının %2'si oranında nanosilika ile modifiye etmiştir. TMA karışım numuneleri nem hasarına duyarlılık, rijitlik ve tekerlek izi direnci açısından değerlendirilmiştir. Sonuçlar, nanosilika ilavesinin rezilyans modülünü artırdığını, tekerlek izi derinliğini azalttığını ve gerekli nem direncinin sağlandığını göstermiştir.

Masri vd. (2022), nano TiO_2 ile modifiye edilmiş bitümün özelliklerini ve bu bitümle hazırlanan TMA karışımların performansını incelemişlerdir. Çalışmada bitümün penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri yapılmış; modifiye

bitümün morfolojik ve kimyasal özellikleri FTIR, XRD ve SEM-EDX analizleri ile değerlendirilmiştir. Ayrıca TMA karışımların hacimsel özellikleri incelenmiştir. Sonuçlara göre, %5 nano TiO₂ ilavesi penetrasyon ve yumuşama noktası değerlerinde, %3 nano TiO₂ ilavesi ise kimyasal ve morfolojik özelliklerde en belirgin iyileşmeleri sağlamıştır. Nano TiO₂ ilavesi ile TMA karışımların hacimsel özelliklerinde de iyileşmeler gözlenmiştir.

5. SONUÇ

Taş mastik asfalt (TMA) karışımlar, yüksek tekerlek izi direnci ve dayanıklılığı nedeniyle yoğun trafik yüküne sahip yol kaplamalarında yaygın olarak kullanılan bir sıcak karışım asfalt türüdür. Yüksek iri agrega oranı ve mastik harç (bitüm, ince agrega ve mineral fillerden oluşan) sayesinde üstün performans göstermesine rağmen, TMA karışımlarda bitüm süzülmesi ve uzun hizmet ömrü boyunca trafik yükleri altında meydana gelebilecek deformasyonlar gibi bazı olumsuzluklar görülebilmektedir. Bu nedenle TMA karışımların performansının geliştirilmesine yönelik farklı iyileştirme çalışmaları yapılmaktadır.

Bitüm modifikasyonu, asfalt karışımların mekanik ve reolojik özelliklerini geliştirmede etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Literatürde polimerler, nanomalzemeler ve atık esaslı katkıları kullanılarak gerçekleştirilen bitüm modifikasyon çalışmalarında genel olarak bağlayıcının daha yüksek rijitlik kazandığı, sıcaklık hassasiyetinin azaldığı ve kalıcı deformasyona karşı dayanımının arttığı görülmektedir. Modifikasyon, artan trafik yükleri ve değişken iklim koşulları altında kaplama performansının uzun vadede korunmasını sağlamada önemli bir rol oynamaktadır.

Literatürde yer alan bitüm modifikasyonu çalışmalarında, TMA karışımlarda kullanılan modifiye bitümlerin tekerlek izi direnci, yorulma ömrü ve nem hasarına karşı dayanım üzerinde olumlu etkiler sağladığı görülmektedir. Atık kökenli malzemelerin bitüm modifikasyonunda kullanılması ile geri dönüşüm olanaklarını artırmakta, çevresel sürdürülebilirliğe katkı sunmaktadır.

Sonuç olarak, bitüm modifikasyonunun taş mastik asfalt karışımların performansını belirleyen önemli bir parametre olduğu görülmekte, TMA karışımlarda bitüm modifikasyonuna yönelik çalışmalar, yüksek performanslı, uzun ömürlü ve sürdürülebilir yol kaplamalarının elde edilmesinde temel ve vazgeçilmez bir rol oynamaktadır.

KAYNAKLAR

- Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M. R., Abdelaziz, M., & Shafigh, P. (2011). Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt. *Materials & design*, 32(10), 4844-4849.
- Al-Hadidy, A. I., & Tan, Y. Q. (2009). Mechanistic analysis of ST and SBS-modified flexible pavements. *Construction and Building Materials*, 23(8), 2941-2950.
- Al-Hadidy, A. I., Yi-Qiu, T., & Hameed, A. T. (2011). Starch as a modifier for asphalt paving materials. *Construction and Building Materials*, 25(1), 14-20.
- Arshad, A. K., Shaffie, E., Hashim, W., Ismail, F., & Masri, K. A. (2019). Evaluation of nanosilica modified stone mastic asphalt. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 10(2), 1508-1516.
- Awwad, M. T., & Shbeeb, L. (2007). The use of polyethylene in hot asphalt mixtures. *American Journal of Applied Sciences*, 4(6), 390-396.
- Fakhri, M., Shahryari, E., & Ahmadi, T. (2022). Investigate the use of recycled polyvinyl chloride (PVC) particles in improving the mechanical properties of stone mastic asphalt (SMA). *Construction and Building Materials*, 326, 126780.
- Karayolu Teknik Şartnamesi. (2013). Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Kordi, Z., & Shafabakhsh, G. (2017). Evaluating mechanical properties of stone mastic asphalt modified with Nano Fe₂O₃. *Construction and Building Materials*, 134, 530-539.
- Köfteci, S., Ahmedzade, P., & Kultayev, B. (2014). Performance evaluation of bitumen modified by various types of waste plastics. *Construction and Building Materials*, 73, 592-602.
- Kök, B. V., Yilmaz, M., & Akpolat, M. (2016). Performance evaluation of crumb rubber and paraffin modified stone mastic asphalt. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 43(5), 402-410.
- Lesueur, D. (2009). The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Advances in colloid and interface science*, 145(1-2), 42-82.
- Mashaan, N. S., Ali, A. H., Koting, S., & Karim, M. R. (2013). Performance evaluation of crumb rubber modified stone mastic asphalt pavement in Malaysia. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013(1), 304676.
- Masri, K. A., Shamimi Mohd Zali, N. S., Jaya, R. P., Seman, M. A., & Mohd Hasan, M. R. (2022). The influence of nano titanium as bitumen modifier in stone mastic asphalt. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022(1), 4021618.

- Morea, F., Nosetti, R., Gonzalez, L., & Sánchez, A. (2023). Performance analysis of non-conventional Stone Mastic asphalt (SMA) elaborated with crumb rubber bitumen or by mean of glass macrofibers addition. *Construction and Building Materials*, 400, 132654.
- Nejad, F. M., Aflaki, E., & Mohammadi, M. A. (2010). Fatigue behavior of SMA and HMA mixtures. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1158-1165.
- Öner, J., & Özdaş, F. (2022). Taş Mastik Asfalt Karışımlarında Tekstil Atığı Kullanımının Araştırılması. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(2), 522-533.
- Porto, M., Caputo, P., Loise, V., Eskandarsefat, S., Teltayev, B., & Oliviero Rossi, C. (2019). Bitumen and bitumen modification: A review on latest advances. *Applied sciences*, 9(4), 742.
- Putman, B. J., & Amirkhanian, S. N. (2004). Utilization of waste fibers in stone matrix asphalt mixtures. *Resources, conservation and recycling*, 42(3), 265-274.
- Sadeghnejad, M., & Shafabakhsh, G. (2017). Use of Nano SiO₂ and Nano TiO₂ to improve the mechanical behaviour of stone mastic asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 157, 965-974.
- Šernas, O., Vaitkus, A., & Škuldeckė, J. (2023). Performance of crumb rubber bitumen and asphalt modified in the wet process alone and in combination with SBS polymer. *Road Materials and Pavement Design*, 24(sup1), 107-123.
- Tayabji, S. D., Smith, K. D., Van Dam, T. J., & Tyson, S. S. (2010). Advanced high-performance materials for highway applications: A report on the state of technology.
- Xavier, R. M., Martin, B., Babu, L. A., Jose, L. E., & Roy, L. (2018). A review on fiber modified stone matrix asphalt. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 5(3), 3018-3020.

BÖLÜM 41

Radyolojik Olarak Atmosferik Dağılım

Hüseyin Şahiner¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Sinop Üniversitesi, Nükleer Enerji Mühendisliği,
ORCID: 0000-0002-3191-1590

GİRİŞ

Nükleer reaktörler, koru yüksek radyasyon ortamına sahip bir santral bileşenidir. Burada fisyon reaksiyonları sonucunda radyoaktif izotoplar, nötronlar ve diğer radyasyon türleri (parçacık veya elektromanyetik dalga formunda) oluşur. Kaza durumlarının dışında bu radyasyon, zırhlama (derinliğine savunma prensibine göre) katmanları sayesinde doğal radyasyon seviyesine düşer. Kor kazanın bütünlüğünü kaybettiği kaza koşullarında ise radyasyon veya radyasyon kaynaklarının çevreye yayılımı olur. Bu yayılma havadan, topraktan ve sudan karışımı ve yayılımı yollarıyla gerçekleşebilir. Belirtilen yayılım yollarından hava, radyasyonun ve kaynaklarının en hızlı yayıldığı yoldur.

Reaktör korunda oluşan fisyon ürünleri katı, sıvı ve gaz formunda olabilir. Gaz formunda olan veya aerosol davranışı gösteren katı veya sıvı partiküller de havada yayılımı gerçekleşebilir. Toprak ve sudaki yayılımla karşılaştırıldığında, radyasyon ve radyasyon kaynaklarının havada yayılımı daha geniş alanlara daha hızlı bir şekilde ulaşır (Till ve Meyer, 1983). Havadaki bu yayılıma rüzgar, sıcaklık, yağış ve nemlilik gibi atmosfer olaylarının etkisi büyüktür. Atmosfer olayları tamamı temelde sıcaklığın atmosferdeki dağılımında görülen farklardan meydana gelir. Genellikle kaynağın dikeydeki dağılımını atmosferik kararlılık, yataydaki dağılımını rüzgar yönü ve şiddeti belirler (Canbulat, 2020). Atmosferde sıcaklık kaynağı güneş ışınlarıdır, ancak doğrudan güneş ışınlarından ısınmaz. Güneş ışınları atmosferdeki gazları titreştirir ve sıcaklık artışı olur ya da yeryüzünden iletim ve yayılım yolları ile gerçekleşen ısı transferi sonucunda sıcaklık artışı meydana gelir. Yine atmosferin nemliliği ısının havada tutulmasında da önemli bir etkidir. Havanın taşıdığı nem miktarı havanın atmosferde ne kadar yükseleceğini de gösterir. Fakat nemli hava yükseldiğinde basınç azalacağı için hava kütlelerinin termodinamik özellikleri değişecektir (Çimen, vd., 2007). Normal durumlarda yükseldikçe her 100 m’ de hava sıcaklığı 0,5 °C azalır.

Atmosfer kararlılığını etkileyen bir diğer faktör de topoğrafyadır. Rüzgar yeryüzüne yakın noktalarda sürtünmeye bağlı olarak hızı azalır. Yine engebeli arazi (vadi, sıra dağlar, vb.) rüzgar koridorları ya da inversiyon tabakası oluştururlar. Bu da atmosferdeki hava akışını ve dolayısıyla kararlılığı etkiler (Türkeş, 2010). Bunlara ek olarak yeryüzüne yakın noktalarda rüzgar davranışına bitki örtüsünün (çim alan, maki, ormanlı saha, vb.) etkisi de bulunmaktadır.

Kararlı atmosfer tabakasının kalınlığı bir başka etken olarak atmosferik dağılımı etkiler. Atmosferin gece veya gündüz durumlarında ısı sığasını değiştirecek faktörler bulunabilir. Su rezervuarları (denizler, göller, büyük ve durgun akarsular, yeraltı kimyasal kaynakların yüzeye vurma noktaları, vb.); ormanlık alanlarda gece CO₂ salınımı, gündüz O₂ salınımı başlıca örnekler olabilir.

Atmosferde kirleticiler yayılırken atmosfer olaylarından dolayı azalma mekanizmalarına maruz kalırlar. Kirleticilerin oluşturduğu bulutsu kaynaktan çıktıktan sonra atmosfer olaylarının gerçekleşmesine katılabilir ya da bu olaylardan etkilenebilir. Kirletici bulutsu atmosferde ilerlerken bir yağış (yağmur, kar, dolu, vb.) oluşumunun altından geçerken bulutsu içerisindeki kirleticilerin bir kısmı yağış ile yeryüzüne depolanmaları gerçekleşebilir. Yine bulutsu, yağış oluşumunda yağış parçacıklarının içerisinde katkı malzemesi olarak katılabilir. Bu durumda da bir miktar kirletici yeryüzüne depolanır. Bu iki duruma ıslak depolama denir. Bulutsu içerisindeki kirleticiler atmosferde ilerlerken yeryüzüne yayılım nedeni ile temas ederek depolama işlemi gerçekleşebilir. Bu duruma da kuru depolama denir. Şekil 1’ de kirleticilerin azalma mekanizmaları verilmektedir. Radyoaktif özelliği bulunan kirleticilerde ise radyoaktivitenin doğası gereği bozunma mekanizması da bir azaltıcı mekanizma olarak rol oynar. Radyoaktif atom çekirdekleri belirli bir yarılanma ömrüne sahiptirler. Bu çekirdekler bir yarılanma ömrü geçirdiklerinde miktarları yarıya düşer.

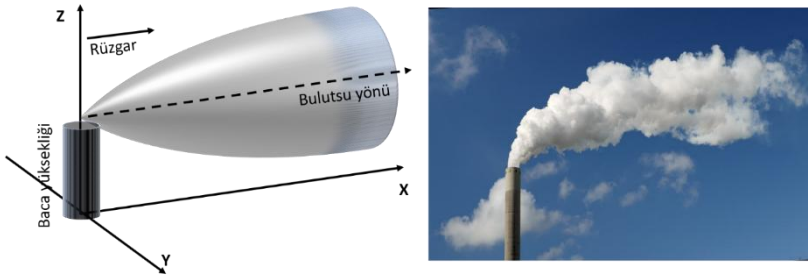
Şekil 15: Atmosferde yayılan kirleticilerin azalma mekanizmaları (Till ve Meyer, 1983).

Kirletici kaynakların atmosferde yayılımını modelleyen istatistiki, Euler/grid, Lagrange ya da bilgisayar hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) gibi birçok yöntem bulunmaktadır (Russell, 2009; Wang, vd., 2016). Ancak radyolojik açıdan en çok kullanılan yöntem Gaussian Bulutsu yöntemidir. Gaussian Bulutsu yöntemi çok eski yöntemlerden biri olmakla beraber, modelde birçok varsayım

yapılmaktadır. Bu varsayımlar konservatif yönde sonuçlar verdiği için tam doz hesaplarında kullanılamazken, önleme çalışmaları için vazgeçilmez bir yöntem olmaktadır. Temel yaklaşım Eşitlik 1' de verilmiştir.

$$\Psi = \frac{Q}{(2\pi)^{2/3} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(x - x_0)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y - y_0)^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z - z_0)^2}{\sigma_z^2} \right] \right\} \quad (1)$$

Burada Q salınının aktivitesini, sigma Gauss dağılımının varyansını, x-y-z koordinatları gösterir. Gauss dağılımına göre dağılan bir kirleticinin rüzgar ve atmosfer kararlılığına bağlı olarak rastgele bir yöne doğru yayılan bulutsu yayılım şekli ve gerçek görüntüsü **Hata! Başvuru k aynağı bulunamadı.** de gösterilmiştir.



Şekil 2: Gauss dağılım modeli ile atmosferde yayılım.

Gauss modelinin geçerli olması için gerekli bazı varsayımlar yapmak gerekir. Atmosferik türbülansın homojen olması; yani modelin uygulandığı tüm noktalarda atmosfer aynı olduğu kabul edilir. Konsantrasyon ve türbülansın zamanla değişmemesi; bu durum yine atmosferin homojenliği ile ilişkili olup atmosfer içerisinde türbülans değerlerinin ve atmosferi oluşturan gazların miktarında ve yoğunluğunda değişiklik olmaması anlamına gelir. Sabit atmosferik akış; rüzgarın atmosferde hızını değiştirmeden sabit bir şekilde aktığı varsayılır. Sıfırdan farklı rüzgar hızı; Gauss modelinde hesaplama yapılabilmesi için rüzgar hızının sıfırdan farklı olması gerekir. Rüzgar hızının sıfır olduğu yani atmosferdeki hava tabakasının durağan durumları modelde çözüm vermez (Till ve Meyer, 1983).

Meteorolojik olarak rüzgar hızı genellikle yeryüzünden 10 m yükseklikte ölçülmektedir. Ancak atmosfere yayılan kirleticilerin yayıldıkları noktaların yükseklikleri farklı olabilir. Bu durumda da üstel rüzgar hızı formülü (Eşitlik 2) kullanılır. Alternatif formül olarak logaritmik hız profili de (Eşitlik 3) kullanılabilir.

$$\frac{u(z)}{u(z_0)} = \left(\frac{z}{z_0} \right)^m \quad (2)$$

m=üstel hız profilini, $z_0=10$ m' deki hızı ifade eder.

Veya

$$u(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{l} \right) \quad (3)$$

u^* : sürtünme hızını, l : pürüzlülük katsayısını, κ : von Karman sabitini ifade eder.

Atmosferik dağılım modeli atmosferin kararlılık durumuna yakından bağlı olduğu belirtilmişti. Bununla birlikte atmosfer için birçok kararlılık kriteri mevcuttur. Nükleer salınımlar için en çok kullanılan modellerden biri Pasquill-Gifford (Pasquill, 1961; Gifford, 1961) kararlılık kriteridir (Canbulat, 2020). Pasquill kararlılık kriteri atmosferde 10 m' deki rüzgar hızını, gündüz güneşlilik ve gece bulutluluk değerleri baz alır. Tablo 1' de kararlılık seviyeleri belirtilmiştir (Till ve Meyer, 1983). Etkilerinden bahsetmek atmosferin kararlılığını anlamlandırmakta kolaylık sağlar. Kirleticinin oluşturduğu hava parseline (bulutsu yapı) net etkiyen bir kuvvet yoksa atmosfer nötr kabul edilir. Kuvvetler hava parselini kaynaktan uzaklaştırıcı etki gösterdiği durumda ise atmosfer kararsız kabul edilir. Bunun tam tersi olarak kuvvetler, parseli kaynağa geri döndürecek şekilde etki ediyorsa atmosfer kararlı denilir. Tablo 1' de Pasquill ara kararlı durumları da belirtmiştir.

Tablo 4: Pasquill-Gifford kararlılık tablosu (Pasquill, 1961; Gifford, 1961)

A: Aşırı kararsız durum B: Ilımlı kararsız durum C: Hafif kararsız durum			D: Nötr durum E: Hafif kararlı durum F: Ilımlı kararlı durum		
10 metredeki yüzey rüzgar hızı [m/s]	Gündüz Güneşlilik			Gece Durumu	
	Güçlü	Ilımlı	Hafif	3/8> Bulutluluk	3/8≤ Bulutluluk
<2	A	A-B	B		
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
6>	C	D	D	D	D

Pasquill kriterine alternatif kararlılık kriterleri de bulunmaktadır. McElroy (McElroy, 1971), Richardson sayısını kullanarak kararlılık kriteri kullanmıştır. Vogt (Vogt 1971), Pasquill kriterinde belirsizliği azaltmak için G ve E kategorilerini de eklemiştir. Bunu dışında dikey sıcaklık değişimi, Monin-Obukhov uzunluğunu (Monin ve Obukhov 1954), rüzgar hızındaki yatay dalgalanmayı da kullanan alternatif kriterler bulunmaktadır.

Atmosferik dağılım ve hava olayları gezegensin sınır tabakası (veya atmosferik sınır tabakası) içerisinde gerçekleşir. Bu tabaka genellikle 200 m ile 200 m arasında değişir ve yeryüzü şekillerine yakından bağlıdır (Blumsack, 1971; Culverwell, 2016). Genellikle günlük alanlarda bu tabaka daha ince olur. Atmosferik kararlılık denildiğinde salınımların dağılımında etkili olduğu için bu tabakanın içinde kalan kararlılıktan bahsedilmektedir.

Tüm bahsedilen bu yayılım mekanizmaları radyasyonun atmosferde nereye nasıl dağılacığı hakkında temel bir yaklaşım sağlar. Bu yaklaşımla afet yönetimine önemli bir rehberlik elde edilir.

KBRN YAKLAŞIMINDA RADYOLOJİK DAĞILIM

KBRN (Kimyasal-Biyolojik-Radyolojik-Nükleer) tehditler içerisinde radyasyonun atmosferden dağılımı önemli bir afet konusu olarak karşımıza çıkar. Afet planlamasında radyasyon kaynaklarının atmosferden ne kadar yayılacağı, nerelere ıslak depolama veya kuru depolama gerçekleşeceği hesaplamaları, kapsamlı bir rehberlik hizmeti gerçekleştirir. Bu hesaplamalar aynı zamanda radyoaktif yayılımların insan ve çevre sağlığı üzerine etkileri ile ilgili sonuçlar verir. Yayılımda hesaplama söz konusu bölgeye depolanan radyasyon miktarı, insanların aldıkları içsel veya dışsal doz değerlerini hesaplamalarla elde edilir. Elde edilen doz değerleri bir kaza durumunda acil planlama alanı, uzun süreli planlama alanları belirlenmesinde kullanılır. Acil planlama alanında halkın tahliye edilmesi, acil durum personellerinin bu alanda çalışma sürelerinin kısıtlanmasına dair bilgiler elde edilir. Uzun süreli planlamada ise, tarım ve hayvancılık ürünlerinin kısıtlama süreleri ve kısıtlama alanları hakkında bilgiler elde edilir. Bu hesaplamalar basit olmasına rağmen elle yapıldığında önemli iş yükü getirir. Ancak basit bilgisayar programları ile daha kısa sürede daha kapsamlı bilgiler elde edilebilir.

DOZ HESAPLAMALARI

Doz tanımı radyasyonun birim kilogram kütle başına depo ettiği Joule cinsinden enerji olarak tanımlanabilir ve SI birimi Gray (Gy)' dir. Depo edilen enerji kavramından dolayı bu doz soğrulan doz olarak da bilinir. Ancak her radyasyon türünün biyolojik etkileri farklıdır. Bu biyolojik etkileri içermesi için Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi (International Commission on Radiological Protection (ICRP)), tarafından eşlenik doz kavramı geliştirilmiştir. Eşlenik doz bir kalite faktörü ile soğrulan dozun çarpımından elde edilir ve birimi SI sisteminde Sievert (Sv)' dir. Kalite faktörü deneysel olarak her bir radyasyon türüne göre belirlenmiş sabit sayılardan oluşur. Bunlara ek olarak herbir doku içerisinde farklı atomlardan oluşacağı için radyasyon türü aynı olsa bile organlar radyasyon türüne farklı şekilde cevap verebilirler. Bu nedenle yeni bir doz tanımı gerekmektedir. Efektif doz farklı radyasyon türlerinin farklı organlara etkisini ifade etmek için kullanılır. Efektif doz, eş değer dozun ağırlık faktörleri ile çarpılmasından elde edilir ve birimi yine Sievert (Sv)' dir. Ağırlık faktörleri her

bir organ için ayrı ayrı deneysel olarak radyasyonun stokastik etkilerinden elde edilmiştir. Tablo 2’ farklı doz tanımları matematiksel ifadeleri verilmiştir. Sonuç olarak efektif doz, soğrulan doz ile radyasyon türüne ait kalite faktörü ağırlık değeri ve dokular için elde edilmiş ağırlık değerlerinin çarpımından elde edilir (Turner, 2007).

Tablo 5: Doz tanımları

Doz Tanımı	Doz Karşılığı
Soğrulan Doz [Gy]	$D = \frac{\text{Enerji [Joule]}}{\text{Kütle [kg]}}$
Eşdeğer Doz [Sv]	$H_T = w_R \times D$
Efektif Doz [Sv]	$E = w_T \times H_T \text{ veya } = w_T \times w_R \times D$

ATMOSFERİK YAYILIM PROGRAMLARI

Atmosfer şartları, yeryüzü şekilleri, yayılım kaynağı, doz alıcısı, tarım ve hayvancılık ürünleri, canlı organları gibi girdileri alıp yayılım ve depolanan doz miktarını hesaplamada kullanılan bazı bilgisayar kodları mevcuttur. Aşağıda verilen programlar genellikle güvenilirlikleri ve doğrulukları test edilmiş programlardır. Ancak bu programların haricinde de benzer hesaplamaları yapan, görselleyen programlar mevcuttur.

HotSpot

HotSpot (Homann ve Aluzzi, 2014) sağlık fiziki kodu olup acil müdahale ekipleri için geliştirilmiş bir bilgisayar programıdır. Dağıtımı Amerikan Enerji Bakanlığı tarafından yapılmakta olup ücretsiz temin edilebilir. Radyoaktif patlamalar, plutonyum patlaması, uranyum patlaması, radyoaktif serpinti gibi bir çok nükleer kazanın simülasyonunda kullanılmaktadır. İlk müdahale ekipleri için geliştirildiğinden kısa süreli bir zaman için analizi kapsar. Bu süre 30 günden fazla değildir.

HotSpot programının kullanımı kolay olduğu gibi sonuçlarının gösterimi de kolaylıkla anlaşılabilir grafik şeklindedir. Sonuçlar isteğe bağlı olarak tablo halinde de verilebilmektedir. Yine isteğe bağlı olarak sonuçlar harita üzerinde kullanılabilecek dosya formatında da üretilebilmektedir.

HotSpot kodu ile ilk müdahale ekiplerine rehberlik yapacak çalışmalar ile radyoaktif salınım çalışmaları araştırma reaktörleri (Lazani ve Chalaris, 2015), (Belhaj, vd., 2015), (Sadeghi, vd., 2013), yakıt dönüşüm santrali (Malizia, vd., 2014), Fukushima kazası (Shamsuddin vd., 2017), Chernobyl kazası (Cacciotti vd., 2014) kirli bomba (Di Giovanni vd., 2014), biyolojik atık tesisi, çimento fabrikası ve sterilizasyon tesisi (Di Giovanni vd., 2014), (Malizia vd., 2014), (Lazani ve Chalaris, 2015) alanlarında yapılmıştır. Burada belirtilen çalışmalarda

meteorolojik veriler ve simülasyon parametrelerinin detaylı verileri belirtilmemiş olmamasına rağmen literatür taramasında yol göstermiştir.

Olası bir kaza senaryosu tasarlarken varsayımlar gerçeği yansıtmalı ve ciddi seviyelerde sonuçlar üretmelidir. Gerçeksi kötü bir durumu yansıtmalı ile benzer bir durum olduğunda gerekli hazırlıklar önceden alınmış olur. Nükleer santralde patlamalı bir kaza olduğunda sıcaklık ve duman yakıt içerisindeki fisyon ürünlerini havaya kaldırır. Bunlardan ağır olanlar hemen ilerlemeden santral içerisinde çökerken, hafif olanlar rüzgar etkisi ile çok uzak mesafelere ulaşabilir. Yağış veya yükselti ile karşılaşılıp toprak tarafından emilene kadar atmosferde kalır (Di Giovanni vd., 2014).

CAP88

Cap88 (Clean Air Act Assessment Package – 1988) programı (Deborah, 1990) yine HotSpot ile benzer analizleri uzun süreli durumlar için yapar. Yine Amerikan Enerji Bakanlığı tarafından dağıtımı yapılır, ücretsiz bir şekilde temin edilebilir. Kullanımı HotSpot programına göre daha komplekstir. Sonuçlar tablo halinde verilir, kullanıcı isteğe göre bu sonuçları başka grafik programları kullanarak grafiklendirir. Cap88 radyasyonun etkilerini uzun süreler için verdiği için bu program iyileştirme çalışmaları için kullanılabilir. Yine program çıktıları radyoaktif salınım sonucu oluşan doz ve organ bazlı risk değerleri elde edilebilir.

CAP88, altı kaynağa kadar radyasyon salınımını Gauss Bulutsu Modeline göre çözüm yapar. Bu kaynaklar yeryüzünden bir zenginleştirme tesisinden atıktan, bir bacadan salınımına kadar modelleme yapabilir. Ancak modellemede farklı kaynaklardan ayrı ayrı kaynak salınımını takip etmek yerine homojenleştirilmiş bölgesel kaynak tanımına göre çözüm ileriye iletilir. Bulutsu parselin yükselmesi momentum veya hidrostatik varsayımlarına ayrı ayrı çözülebilir. Burada genellikle kaynaktan salınım yüksek hızlarda veya basınçlı salınımsa momentum varsayımı ile çözüm, düşük hızlarda bir salınımsa hidrostatik çözüm yapılır. Çözüm sonuçları 80 km lik bir alanda 16 rüzgar sektöründen oluşan dairesel bir grid yapıda elde edilir. CAP88 benchmark ve doğrulama çalışmalarında (Maheres, 1994; Fields, vd., 1984), yakıt işleme tesisinden yayılan radyasyon salınımı (Fritz ve Phillips, 2013), kanser riski yayılımı (Sadeghi, vd., 2013) gibi çalışmalarda kullanılmıştır.

RASCAL

RASCAL (Athey, 2007), Radyolojik Sonuç Analizi için Değerlendirme Sistemi (Radiological Assessment System for Consequence Analysis) kodları serisindendir. Dağıtımı ORNL (Oak Ridge National Laboratory) laboratuvarı tarafından yapılır. Kullanım amacına göre ücretli veya ücretsiz olarak temin edilebilir. RASCAL; nükleer güç santrallerinden, kullanılmış yakıt havuzları ve kaplarından, yakıt çevrimi tesislerinden ve radyoaktif madde tesislerinden

kaynaklanan salımları değerlendirmektedir. ABD Nükleer Düzenleme Komisyonu (U.S. Nuclear Regulatory Commission, NRC) için geliştirilmiş olan RASCAL, radyolojik acil durumlara müdahale sırasında doz öngörüsü amacıyla kullanılmak üzere tasarlanmıştır. RASCAL, ilk iki programa göre spesifik LOCA (loss-of-coolant-accident) soğutucu suyu kaybı kazalarından salınımı da hesaplamaya dahil edebilir. Program müdahale personeli tarafından alınacak dozu öngörme amacıyla acil durum planlamalarında kullanılır. Ayrıca eğitim ve tatbikat amaçlı sonuçlar kullanılır. Kaynak terimi ile hesaplamalar, çok çeşitli olası radyolojik kaza senaryolarına bağlı olarak salınan radyoaktif (veya tehlikeli) madde miktarını tahmin eder. Sistem, dört ana araç ve üç destekleyici araçtan oluşmaktadır. Ana araçlardan ikisi doz hesaplamaları yaparken, diğer iki ana araç ise radyoaktif izotopları ve bunların bozunmalarıyla ilgili bilgileri görüntüler. Şiddetli kaza senaryolarında ve diğer programlarla karşılaştırılmalarında (Akou, vd., 2026; Abbott 2018; Khaer, vd., 2023), planlama alanları ve sürelerinin hesaplamalarında (Khaer, vd., 2023), çoklu organ dozları ve risk tahminleri (Chiyangwa, vd., 2025) alanında kullanılmıştır. Çalışma alanları bunlarla kısıtlı olmayıp burada sadece güncel çalışmalar verilmiştir.

DİĞER PROGRAMLAR

Şimdiye kadar verilen programlar Gauss Bulutsu Modeline göre çözüm yapmaktadır. Buna ek olarak Lagrangian, Eulerian veya hibrit modellerle çözüm yapan başka bilgisayar programları veya kodları bulunmaktadır. Her bir hesaplamanın kendine göre artıları ve eksileri olduğu için kullanım amaçları da değişmektedir. Burda genellikle acil durum planlaması yapmaya yardımcı programlar ele alınmıştır. Yukarıdaki programlara ek olarak acil durum planlamalarında kullanılan RODOS (Ehrhardt, vd., 1993) Avrupa acil durum programı verilebilir. RODOS yardımıyla gelecekteki çevresel kontaminasyon ve beklenen dozlar tahmin edilebilir. Bu tahminler, yetkili makamlar tarafından uygulanabilecek nüfusun tahliyesi gibi özel acil durum müdahale önlemlerinin belirlenmesi için temel oluşturur. HYSPLIT (Stein, 2015) atmosferde yayılan genel kirletici takibini daha büyük skalalar için gerçekleştirir. Radyolojik olarak değerlendirme yapmaz ancak radyolojik kirleticilerin takibini yapar. FLEXPART (Pisso, vd., 2019), CALPUFF (URL1) gibi Lagrangian parçacık modeline göre hesaplama yapan kodlar da mevcuttur.

RASCAL ve HOTSPOT acil durum planlamalarında kullanılır ve hızlı hesaplama yapma özelliğine sahiptir. CAP88 rutin salınımlardaki doz değerlerini belirler ve lisanslama süreçlerinde kullanılır. FLEXPART ve HYSPLIT uzun menzilli taşımaların hesaplamalarında kullanılır.

KAYNAKLAR

- Abbott, M. L. (2018). Comparison of U.S. NRC'S Rascal Emergency Response Code with Noaa's Hyrad Dispersion Model and Tracer Experimental Data. *Health Physics*, 115(4), 448-457
- Akou, O. G., Wang, X., Liu, S., Liu, X., & Zhang, A. (2026). Severe accident radiological release and dose Assessment: A case study using RASCAL and HotSpot code. *Radiation Physics and Chemistry*, 240, 113434
- Athey, G. F., McGuire, S. A., Ramsdell, Jr., J. V., (2007) U.S. Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Security and Incident Response, NUREG-1889
- Belhaj, B., Khoukh, T. E., Chakir, E. M., Boukhal, H., & Bardouni, T. E. (2015). Assessment of the Radiological Consequences of a Radioactive Release under Wet Weather Conditions in a Research Reactor Accident Scenario. *Modern Applied Science*, 9(3), 241.
- Blumsack, S. L. (1971). On the Effects of Topography on Planetary Atmospheric Circulation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1134-1143.
- Bourscheidt, V., Junior, P., & Naccarato, K. (2009). The Influence of Topography on the Cloud-to-Ground Lightning Density in South Brazil. *Atmospheric Research*, 508-513.
- Cacciotti, I., Aspetti, P. C., Cenciarelli, O., Carestia, M., Di Giovanni, D., Malizia, A., D'Amico, F., Sassolini, A., Bellecci, C., & Gaudio, P. (2014). Simulation of Caesium-137 (137CS) local diffusion as a consequence of the Chernobyl accident using HOTSPOT. *Defence S&T Technical Bulletin*, 7(1), 18-26.
- Canbulat, O. (2020). The impact of topography and boundary layer climate on possible radiological pollution around İnceburun (Sinop) and Akkuyu (Mersin). *Karabuk: Karabuk University, Graduate Studies*.
- Chiyangwa, S., Birikorang, S. A., Agbodemegbe, V. Y. (2025). Assessment of radionuclide dispersion and radiation dose for a hypothetical VVER-1200 accident in Zimbabwe. *Annals of Nuclear Energy*, 224, 111733
- Christoudias, T., Proestos, Y., & Lelieveld, J. (2014). Atmospheric Dispersion of Radioactivity from Nuclear Power Plant Accidents: Global Assessment and Study for the Eastern Mediterranean and Middle East. *Energies*, 8338-8354.
- Cichowicz, R., Wielgosinski, G., & Fetter, W. (2017). Dispersion of Atmospheric Air pollution in Summer and Winter Season. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189:605/doi: 10.1007/s10661-017-6319-2.
- Çimen, N., Yağan, Y., & Polatkan, Ö. (2007). *Aeroloji*. Ankara: T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü.
- Culverwell, L. (2016). The Calculation of Planetary Boundary Layer Heights in ROPP. UK: Radio Occultation Meteorology.

- Ehrhardt, J., PSsler-Sauer, J., Schiile, O., Benz, G., Rafat, M., Richter, J. (1993). Development of RODOS, a comprehensive decision support system for nuclear emergencies in Europe-an overview. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 50, Nos 2-4, pp 195-203
- Deborah A. B. (1990). The Clean Air Act Assessment Package-1988 (Cap-88), A Dose And Risk Assessment Methodology for Radionuclide Emissions to Air
- Di Giovanni, D., Luttazzi, E., Marchi, F., Latini, G., Carestia, M., Malizia, A., Gelfusa, M., Fiorito, R., D'Amico, F., & Cenciarelli, O. (2014). Two realistic scenarios of intentional release of radionuclides (Cs-137, Sr-90)–the use of the HotSpot code to forecast contamination extent. *WSEAS Trans. Environ. Dev*, 10, 106-122.
- Fields, D. E., Miller, C. W., & Cotter, S. J. (1984). Validation of the AIRDOS-EPA computer code by simulating intermediate range transport of 85Kr from the Savannah River Plant. *Atmospheric Environment* (1967), 18(10), 2029-2036.
- Flint, A. L. (1987). The Effect of Surrounding Topography on Solar Radiation. *Proceedings of the Vancouver Symposium*, 339-347.
- Fritz, B. G., Phillips, N. R. J. (2013). Use of CAP88 PC to infer differences in the chemical form of 129I emitted from a fuel reprocessing facility. *Journal of Environmental Radioactivity*, 120, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.01.015>
- Gifford, F. A., (1961). Use of Routine Meteorological Observations for Estimating Atmospheric Dispersion, *Nuclear Safety*, Vol. 2, 47-57
- Homann, S. G., Aluzzi, F. (2014) HotSpot, Health Physics Codes Version 3.0, National Atmospheric Release Advisory Center, Lawrence Livermore National Laboratory
- John E. Till, H. Robert Meyer (1983). *Radiological Assessment: A Textbook on Environmental Dose Analysis*. Oak Ridge National Lab., TN (USA): NUREG/CR-3332; ORNL-5968
- Khaer, M. A., Hoq, M. A., Hassan, S. M. T., Chowdhury, M. T., & Rahman, M. M. (2023). Assessment of radiological dose and emergency planning zones of TRIGA Mark-II research reactor of Bangladesh due to a postulated severe accidental condition. *Nuclear Engineering and Design*, 415, 112727
- Lazani A., Chalaris, M. (2015). Nuclear and Radiological Incident Scenarios Case Study Models at a Nuclear Research Reactor and at a Co-60 Radiator in the Region of Attica-Greece. 2(3), 1-7.
- Lehner, M., Rotach, W. (2018). Current Challenges in Understanding and Predicting Transport and Exchange in the Atmosphere over Mountainous Terrain. *Atmosphere*.MDPI, 2018, 9, 276.
- Malizia, A., Carestia, M., Cafarelli, C., Milanese, L., Pagannone, S., Pappalardo, A., Pedemonte, M., Latini, G., Barlascini, O., Fiorini, E., Soave, P. M., Daniele

- Di Giovanni, Orlando Cenciarelli, Luca Antonelli, Fabrizio D'Amico, Leonardo Palombi, Carlo Bellecci, & Pasqualino Gaudio. (2014). The free license codes as Decision Support System (DSS) for the emergency planning to simulate radioactive releases in case of accidents in the new generation energy plants. 10, 453-464.
- McElroy, M.B., (1971). Dissociation Of Co₂ In Martian Atmosphere, *Journal Of The Atmospheric Sciences* 28: 879
- Maheras, S. J., Ritter, P. D., Leonard, P. R., & Moore, R. (1994). Benchmarking of the CAP-88 and GENII computer codes using 1990 and 1991 monitored atmospheric releases from the Idaho National Engineering Laboratory. *Health Physics*, 67(5).
- Monin, A.S., Obukhov, A.M. (1954). "Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere". *Tr. Akad. Nauk SSSR Geofiz. Inst.* 24: 163–187.
- Pasquill, F., (1961). The Estimation of the Dispersion of Windborne Material, *The Meteorological Magazine*, Vol. 90, No. 1063
- Pisso, I., Sollum, E., Grythe, H., Kristiansen, N. I., Cassiani, M., Eckhardt, S., Stohl, A. (2019). The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 10.4. *Geoscientific Model Development*, 12(12), 4955-4997
- Russell, A. (2009). *Computational Fluid Dynamics Modeling of Atmospheric Flow Applied to Wind Energy Research*. Boise State University.USA.
- Sadeghi, N., Sadrnia, M., Khakshournia, S. (2013). Radiation dose calculations for an accidental release from the Tehran Research Reactor. *Nuclear Engineering and Design*, 257(Supplement C), 67-71.
- Shamsuddin, S. D., Basri, N. A., Omar, N., Koh, M.-H., Ramli, A. T., & Hassan, W. M. S. W. (2017). Radioactive dispersion analysis for hypothetical nuclear power plant (NPP) candidate site in Perak state, Malaysia. *EPJ Web of Conferences*, 156, 00009.
- Stein, A. F., Draxler, R. R., Rolph, G. D., Stunder, B. J. B., Cohen, M. D., Ngan F. (2015). NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System", *Bulletin of the American Meteorological Society* 96, 12: 2059-2077
- Turner, A. (2007). "Radiation Dosimetry". Ss. 361-98 içinde *Atoms, Radiation, and Radiation Protection*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Türkeş, M. (2010). *Klimatoloji ve Meteoroloji*. İstanbul: Kriter Yayınları.
- URL1, <https://calpuff.org/> , Erişim: 24/12/2025
- Vogt, R. J. (1971). FRG Report, Jul-807- ST
- Wang, B., Zhang, Q., Guo, R. (2016). Three Dimensional Numerical Simulation of Atmospheric Dispersion Influenced by Complex Underlying Surface Surrounding Nuclear Power Plant. (s. 1-4). Charlotte, Nort Carolina: International Conference on Nuclear Engineering.

BÖLÜM 42

Elektrikli Araçların Sürdürülebilir Ulaşım Sistemlerindeki Rolü: Şarj, Batarya ve Enerji Çerçevesinde Bir Değerlendirme

Hakan Yüksel¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü / Teknik Bilimler MYO, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Türkiye, ORCID: 0000-0003-2186-533X

Küresel ulaşım sektörü, sera gazı emisyonlarına, fosil yakıt bağımlılığına, hava kirliliğine ve kentsel çevre bozulmasına yaptığı önemli katkı nedeniyle çağdaş sürdürülebilirlik tartışmalarının merkezinde yer almaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı'na göre, ulaşım, küresel enerjiyle ilgili karbondioksit emisyonlarının neredeyse dörtte birini oluşturmaktadır (IEA, 2025). Kentleşme hızlandıkça ve özellikle gelişmekte olan ekonomilerde hareketlilik talebi artmaya devam ettikçe, geleneksel içten yanmalı motorlu (ICE) araçlarla ilişkili çevresel ve sosyo-ekonomik baskıların yoğunlaşması beklenmektedir. Bu bağlamda, sürdürülebilir ulaşım sistemlerine geçiş, yerel, ulusal ve küresel düzeylerde acil bir politika önceliği haline gelmiştir.

Sürdürülebilir ulaşım, genellikle, mevcut toplumsal ihtiyaçları karşılarken gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneğinden ödün vermeyen, aynı zamanda çevresel etkileri en aza indiren, ekonomik verimliliği teşvik eden ve sosyal eşitliği sağlayan bir hareketlilik sistemi olarak anlaşılmaktadır (Ekwuribe & Poi, 2025; Banister, 2008). Böyle bir sisteme ulaşmak, yalnızca davranışsal değişim ve kentsel planlama reformlarını değil, aynı zamanda araç tasarımı, enerji kaynakları ve altyapıda temel teknolojik dönüşümleri de gerektirir. Ulaşımın karbondan arındırılması için önerilen teknolojik yollar arasında, elektrikli araçlar en öne çıkan ve yaygın olarak tartışılan çözümlerden biri olarak ortaya çıkmıştır.

Elektrikli araçlar; bataryalı elektrikli araçlar (BEV'ler), şarj edilebilir hibrit elektrikli araçlar (PHEV'ler) ve daha yakın zamanda yakıt hücresi elektrikli araçlar (FCEV'ler) dahil olmak üzere egzoz emisyonlarını önemli ölçüde azaltma, enerji verimliliğini artırma ve petrol bazlı yakıtlara olan bağımlılığı azaltma potansiyeli sunmaktadır (Hawkins vd., 2013). Geleneksel araçların aksine, EV'ler elektrik enerjisini önemli ölçüde daha yüksek verimlilikle mekanik güce dönüştürmekte ve çalışma sırasında sıfır doğrudan egzoz emisyonu üretmektedir. Bu özellikler, hava kalitesi endişeleri ve gürültü kirliliğinin ciddi halk sağlığı sorunları oluşturduğu kentsel ortamlar için EV'leri özellikle cazip hale getirmektedir.

Teknolojik açıdan bakıldığında, batarya kimyası, güç elektroniği ve şarj teknolojilerindeki hızlı gelişmeler, son on yılda elektrikli araçların performansını, sürüş menzilin ve güvenilirliğini önemli ölçüde artırmıştır. Lityum iyon pil maliyetleri 2010 yılından bu yana yaklaşık %90 oranında düşerek, daha uygun fiyatlı hale gelmelerine ve pazar rekabet gücünü artırmalarına katkıda bulunmuştur (Curry, 2017). Aynı zamanda, hızlı şarj altyapısı ve akıllı şebeke entegrasyonundaki yenilikler, menzil kaygısını gidermekte ve araçlar ile enerji sistemleri arasında daha sorunsuz bir etkileşim sağlamaktadır. Bununla birlikte, hammadde tedarik kısıtlamaları, pil bozulması, geri dönüşüm zorlukları ve şebeke kapasitesi sınırlamaları gibi teknolojik engeller devam etmekte olup,

bunların tümü sürdürülebilirlik çerçevesinde sistematik bir değerlendirme gerektirmektedir (Hemavathi & Shinisha, 2022).

Ekonomik olarak, elektrikli araçların yaygınlaşması hem fırsatlar hem de zorluklar sunmaktadır. Bir yandan, elektrikli araçların benimsenmesi, içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla daha yüksek enerji verimliliği ve daha az hareketli parça nedeniyle uzun vadeli işletme ve bakım maliyetlerini azaltabilir (Rezvani, Jansson ve Bodin, 2015). Öte yandan, yüksek başlangıç satın alma fiyatları, altyapı yatırım gereksinimleri ve kalan değerlerle ilgili belirsizlikler, birçok bölgede yaygın tüketici kabulünü engellemeye devam etmektedir. Bu nedenle hükümetler, pazar sürecini teşvik etmek ve ölçek ekonomilerini hızlandırmak için satın alma sübvansiyonları, vergi teşvikleri, emisyon düzenlemeleri ve kamu alım programları gibi çok çeşitli politika araçları uygulamıştır (Sierczula vd., 2014). Bununla birlikte, bu tür politika müdahalelerinin uzun vadeli ekonomik sürdürülebilirliği, devam eden akademik ve siyasi bir tartışma konusu olmaya devam etmektedir (Öztürk & İbik, 2025).

Elektrikli araçların çevresel performansı da karmaşık ve bağlama oldukça bağlıdır. Elektrikli araçlar egzoz emisyonlarını ortadan kaldırırken, genel çevresel faydaları elektrik üretiminin karbon yoğunluğuna, araç üretim süreçlerine ve kullanım ömrü sonu yönetimine bağlıdır (Ellingsen vd., 2016). Yaşam döngüsü değerlendirme çalışmaları, elektrikli araçların, özellikle düşük karbonlu elektrik karışımlarına sahip bölgelerde, ömürleri boyunca sera gazı emisyonları açısından geleneksel araçlardan genellikle daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur (Bauer vd., 2015). Bununla birlikte, pil üretimi, kritik mineral çıkarımı (lityum, kobalt, nikel vb.) ve geri dönüşüm altyapılarıyla ilişkili çevresel etkiler konusunda endişeler devam etmektedir. Bu sorunlar, elektrikli araçların izole teknolojiler olarak değil, daha geniş sosyo-teknik ve enerji sistemlerinin ayrılmaz bileşenleri olarak değerlendirilmesinin gerekliliğinin altını çizmektedir.

ELEKTRİKLİ ARAÇ TEKNOLOJİLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Elektrikli araçlar, güç aktarma organı mimarisine, enerji depolama sistemlerine ve elektrifikasyon derecesine göre çeşitli kategorilere ayrılmaktadır. En yaygın olarak kabul edilen kategoriler arasında Bataryalı Elektrikli Araçlar (BEV), Şarj Edilebilir Hibrit Elektrikli Araçlar (PHEV), Hibrit Elektrikli Araçlar (HEV) ve Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar (FCEV) yer almaktadır.

Bataryalı Elektrikli Araçlar (BEV)

Bataryalı Elektrikli Araçlar (BEV), yalnızca araç içi şarj edilebilir batarya paketlerinde depolanan elektrikle çalışan tamamen elektrikli araçlardır. BEV'ler içten yanmalı motor (ICE) içermez ve bu nedenle sıfır egzoz emisyonu üretirler. Tahrik, yalnızca bir veya daha fazla elektrik motoru tarafından sağlanmaktadır (Zhao vd., 2024).

BEV’ler tipik olarak büyük kapasiteli lityum iyon batarya sistemleri kullanmakta ve AC veya DC şarj altyapısı aracılığıyla harici şarja bağlıdır. Sürüş menzillerini, esas olarak batarya enerji yoğunluğu ve şarj koşulları belirlemektedir. Basitleştirilmiş mekanik yapıları ve yüksek aktarma organı verimlilikleri nedeniyle, BEV’ler hibrit alternatiflere kıyasla daha düşük bakım gereksinimleri ve daha yüksek enerji verimliliği sergilemektedir (Hawkins vd., 2013).

Şarj Edilebilir Hibrit Elektrikli Araçlar (PHEV)

Şarj edilebilir Hibrit Elektrikli Araçlar (PHEV), içten yanmalı bir motoru elektrikli bir tahrik sistemi ve elektrik şebekesinden şarj edilebilen şarj edilebilir bir batarya ile birleştirir. PHEV’ler, hibrit çalışma moduna geçmeden önce sınırlı bir mesafe boyunca tamamen elektrikli modda çalışabilir; bu modda içten yanmalı motor, elektrik motoruna yardımcı olur veya onun yerini almaktadır (Farmer vd., 2010).

Bu çift enerjili mimari, PHEV’lerin kısa mesafeli sürüşlerde yakıt tüketimini ve emisyonları azaltırken menzil kaygısını hafifletmesine olanak tanımaktadır. Bununla birlikte, güç aktarma organı entegrasyonunun karmaşıklığı ve hem yakıt hem de elektrik altyapısına duyulan ihtiyaç, ek sistem maliyetleri ve kontrol zorlukları getirmektedir (Mi & Masrur, 2025).

Hibrit Elektrikli Araçlar (HEV)

Hibrit Elektrikli Araçlar (HEV) hem içten yanmalı motor hem de elektrik motoru kullanırlar, ancak PHEV’lerin aksine harici olarak şarj edilemezler. Batarya, rejeneratif frenleme ve motor çalışması yoluyla şarj edilmektedir.

HEV’ler, seri, paralel ve seri-paralel (güç bölmeli) mimariler de dahil olmak üzere çeşitli konfigürasyonlar kullanarak çalışmaktadır. HEV’ler, geleneksel araçlara kıyasla daha iyi yakıt ekonomisi ve daha düşük emisyon sağlarken, yalnızca elektrikle sürüş yetenekleri sınırlıdır ve hala öncelikle fosil yakıtlara bağımlıdır (Ehsani vd., 2018).

Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar (FCEV)

Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar (FCEV), hidrojen yakıt hücresi sistemi kullanarak araç içinde elektrik üretmektedir; bu sistem, hidrojeni elektrokimyasal bir işlemle elektrik enerjisine dönüştürür. Üretilen elektrik, bir elektrik motoruna güç sağlar ve tek doğrudan emisyon su buharıdır. FCEV’ler, geleneksel araçlara kıyasla hızlı yakıt ikmal süreleri ve uzun sürüş menzilleri sunmaktadır. Ancak, yaygın kullanımın önündeki engeller arasında hidrojen üretimi, depolama, dağıtım altyapısı ve genel sistem maliyetiyle ilgili zorluklar yer almaktadır (Ogden vd., 2011).

Tablo 1. Elektrikli Araçların karşılaştırılması

Araç Tipi	Harici Şarj	İçten Yanmalı Motor	Birincil Kaynağı	Enerji	Egzoz Emisyonları
BEV	Evet	Hayır	Elektrik		Yok
PHEV	Evet	Evet	Elektrik + Yakıt		Azaltılmış
HEV	Hayır	Evet	Yakıt		Azaltılmış
FCEV	Hayır	Hayır	Hidrojen		Su buharı

Elektrikli Araç Modellerinde Kullanılan Teknolojiler

Batarya Teknolojileri

Batarya sistemi, elektrikli araçların en kritik bileşenidir ve sürüş menzili, performans, güvenlik ve maliyeti doğrudan etkilemektedir. Günümüzdeki elektrikli araçlar, yüksek enerji yoğunluğu, nispeten uzun çevrim ömrü ve uygun güç-ağırlık oranı nedeniyle ağırlıklı olarak lityum iyon (Li-ion) bataryalar kullanmaktadır. Yaygın Li-ion kimyaları arasında lityum nikel mangan kobalt oksit (NMC), lityum demir fosfat (LFP) ve lityum nikel kobalt alüminyum oksit (NCA) bulunur ve her biri enerji yoğunluğu, termal kararlılık, maliyet ve ömür arasında ödünleşmeler sunmaktadır.

Araştırmalar, sıvı elektrolitlerin yerine katı elektrolitler kullanan ve daha iyi güvenlik, daha yüksek enerji yoğunluğu ve termal kaçış riskini azaltan katı hal bataryalarına odaklanmıştır. Bununla birlikte, üretim ölçeklenebilirliği, arayüz direnci ve malzeme kararlılığı ile ilgili zorluklar şu anda büyük ölçekli ticarileşmeyi sınırlamaktadır (Zhang vd., 2020).

Elektrikli Tahrik Sistemleri ve Güç Elektroniği

Elektrikli araçlar, yaygın olarak kalıcı mıknatıslı senkron motorlar (PMSM) ve indüksiyon motorları olmak üzere elektrikli çekiş motorları kullanmaktadır. PMSM'ler yüksek verimlilikleri ve güç yoğunlukları nedeniyle tercih edilirken, indüksiyon motorları sağlamlık ve nadir toprak elementlerine olan bağımlılığın azalması avantajını sunmaktadır.

İnvertörler, dönüştürücüler ve araç içi şarj cihazları da dahil olmak üzere güç elektroniği, batarya, motor ve yardımcı sistemler arasında elektrik enerjisi akışını yönetmede merkezi bir rol oynamaktadır. Silisyum karbür (SiC) ve galyum nitrür (GaN) gibi geniş bant aralıklı yarı iletkenlerdeki gelişmeler, verimliliği önemli ölçüde artırmış, termal kayıpları azaltmış ve daha yüksek anahtarlama frekanslarına olanak sağlamıştır (Millán vd., 2014).

Batarya Yönetim Sistemleri (BMS)

Batarya Yönetim Sistemi (BMS), voltaj, akım, sıcaklık ve şarj durumunu (SOC) izleyerek güvenli ve verimli batarya çalışmasını sağlamaktadır. Gelişmiş BMS algoritmaları, sağlık durumunu (SOH) tahmin etmekte, hücre voltajlarını dengelemekte ve güvenli olmayan çalışma koşullarını önlemektedir.

BMS'lerde, tahmin doğruluğunu artırmak ve pil ömrünü uzatmak için model tabanlı tahmin tekniklerini ve makine öğrenme algoritmalarını içermektedir. BMS'nin araç kontrol üniteleriyle entegrasyonu ayrıca optimize edilmiş enerji kullanımı ve öngörücü bakım stratejilerini de mümkün kılmaktadır (Plett, 2015).

Rejeneratif Frenleme Sistemleri

Elektrikli araçlar, yavaşlama sırasında kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren ve daha sonra bataryada depolayan bir teknoloji olan rejeneratif frenlemeyi kullanmaktadır. Bu sistem, genel enerji verimliliğini artırmakta ve mekanik fren aşınmasını azaltmaktadır.

Rejeneratif frenlemenin etkinliği, motor tasarımına, güç elektroniğine ve kontrol stratejilerine bağlıdır. Rejeneratif ve sürtünmeli frenlemeyi birleştiren koordineli frenleme sistemleri, değişen yol koşullarında araç stabilitesini ve sürücü konforunu sağlamak için gereklidir (Ehsani vd., 2018).

Termal Yönetim Teknolojileri

Verimli termal yönetim sistemleri, bataryalar, motorlar ve güç elektroniği için optimum çalışma sıcaklıklarını korumak için hayati öneme sahiptir. Elektrikli araçlar, çeşitli çevre ve sürüş koşullarında sıcaklığı düzenlemek için genellikle sıvı soğutma sistemleri, ısı eşanjörleri ve ısı pompaları kullanmaktadır.

Gelişmiş termal yönetim, özellikle aşırı iklimlerde, pil ömrünün uzamasına, güvenliğin artmasına ve araç verimliliğinin yükselmesine katkıda bulunmaktadır. Sistem karmaşıklığını ve enerji tüketimini azaltmak için entegre termal mimariler giderek daha fazla benimsenmektedir (Pesaran vd., 2013).

Şarj Teknolojileri ve Altyapı Uyumluluğu

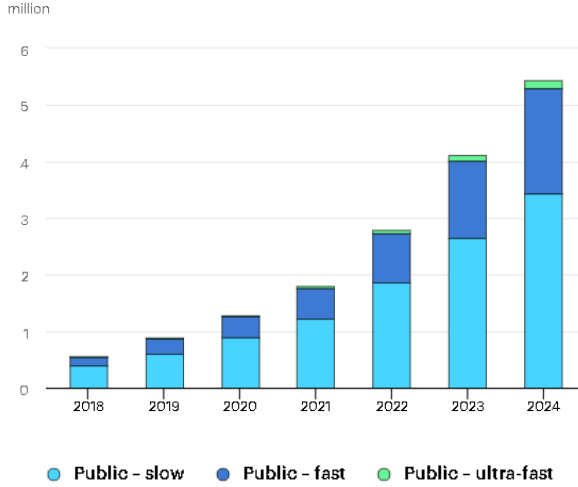
Elektrikli araçlar, AC şarj, DC hızlı şarj ve giderek artan ultra hızlı şarj sistemleri de dahil olmak üzere birden fazla şarj teknolojisini desteklemektedir. Kombine Şarj Sistemi (CCS), CHAdeMO ve GB/T gibi standartlar, araçlar ve şarj altyapısı arasında birlikte çalışabilirliği sağlamaktadır.

Gelişen teknolojiler arasında, elektrikli araçların şebekeye enerji geri vermesini sağlayarak şebeke istikrarını artıran ve yeni enerji yönetim paradigmalarını mümkün kılan çift yönlü şarj ve araçtan şebekeye (V2G) sistemleri yer almaktadır (Kempton & Tomić, 2005).

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR ve ŞARJ

Evde şarj, elektrikli araç sahipleri için en popüler şarj yöntemi olarak bilinmektedir. Bununla birlikte, evde şarj cihazına erişimi olmayan nüfus

kesimleri arasında elektrikli araçların yaygınlaşmasını desteklemek için daha fazla kamu şarj istasyonuna ihtiyaç duyulmaktadır. 2024 yılında, küresel stoklara 1,3 milyondan fazla kamu şarj noktası belirlendi ve bu da bir önceki yıla göre %30'dan fazla bir artışı temsil etmektedir. 2024 yılında eklenen şarj noktalarının sayısı, 2020 yılında mevcut olan toplam nokta sayısına yaklaşık olarak eşitti. 2020' den bu yana kamu şarj noktalarındaki büyümenin yaklaşık üçte ikisi Çin'de gerçekleşmektedir. Çin, şu anda küresel şarj istasyonlarının yaklaşık %65'ine ve elektrikli hafif ticari araç stokunun %60'ına sahiptir.



Şekil 1. 2018-2024 yılları arasında hızlara göre küresel halka açık şarj noktası stoğu (IEA, 2025)

AC Şarj

Alternatif akım (AC) şarjı, elektrikli araç şarjının en yaygın şeklidir ve tipik olarak konut ve iş yeri ortamlarında kullanılmaktadır. AC şarjında, şebekeden gelen elektrik enerjisi, aracın dahili şarj cihazı tarafından doğru akıma (DC) dönüştürülür ve ardından bataryada depolanmaktadır. AC şarjı genellikle daha düşük güç seviyelerinde çalışmakta, bu da daha uzun şarj sürelerine neden olmaktadır. Ancak daha düşük kurulum maliyetleri ve elektrik şebekesi üzerindeki etkisinin azalması açısından avantajlar sunmaktadır (Clement-Nyns vd., 2009).

DC Hızlı Şarj

Doğru akım (DC) hızlı şarjı, dahili şarj cihazını atlayarak doğrudan araç bataryasına DC güç sağlamaktadır. Bu yöntem, önemli ölçüde daha yüksek şarj gücü sağlar ve şarj süresini önemli ölçüde azaltır. Bu da onu halka açık şarj istasyonları ve uzun mesafeli seyahatler için uygun hale getirmektedir. Bununla birlikte, yüksek güçlü DC şarjı batarya bozulmasını artırabilir ve şebeke

altyapısına daha büyük talepler getirebilmektedir. Bu da dikkatli termal ve enerji yönetim stratejilerini gerektirmektedir (Yılmaz & Krein, 2013).

Kablosuz Şarj

Kablosuz veya indüktif şarj, fiziksel bağlantı elemanları olmadan elektromanyetik alanlar aracılığıyla enerji aktarmaktadır. Bu teknoloji kullanıcı kolaylığını ve güvenliğini artırır da iletken şarja kıyasla şu anda daha düşük verimlilik ve daha yüksek maliyetlerden dolayı dezavantajlıdır. Araştırmalar, kablosuz şarjı hem sabit hem de dinamik uygulamalar için uygulanabilir hale getirmek amacıyla güç aktarım verimliliğini ve hizalama toleransını artırmayı hedeflemektedir (Bi vd., 2016).

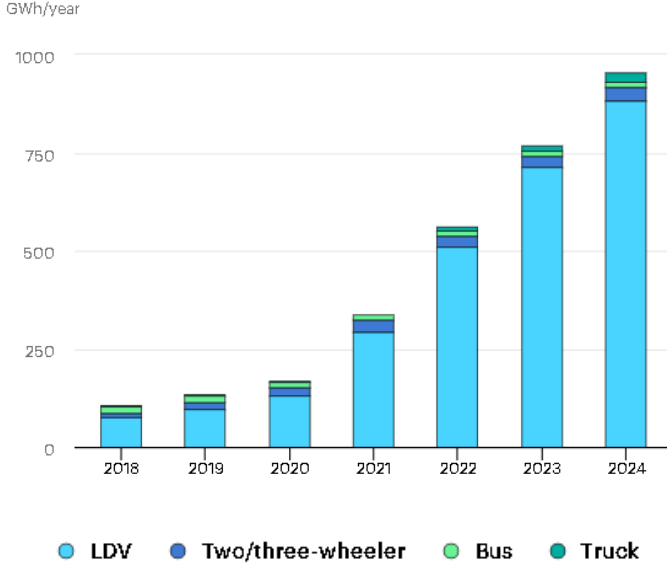
Elektrikli otomobiller için batarya teknolojisindeki gelişmeler, şarj altyapısı da bu gelişmelere ayak uydurabilirse, şarj süresini yakıt ikmal süresiyle rekabet edebilir hale getirebilecektir. Şehir içi şarj istasyonlarının çoğu yavaş şarj istasyonlarıdır, ancak otoyol şarj istasyonları kapasitenin daha büyük bir payını oluşturmaktadır. Ülkeler ve şehirler, nüfus dağılımına, evde şarj imkanına ve yol ağlarına bağlı olarak, kamuya açık şarj istasyonlarının kurulumuna farklı yaklaşımlar benimsemişlerdir, ancak bazı ortak noktalar da vardır. Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri'nde şarj istasyonlarının üçte ikisinden fazlası şehir içi bölgelerde bulunmaktadır. Avrupa Birliği'nde kurulum büyük ölçüde konut modellerini takip etmiş ve nüfusun %70'inden fazlası artık bir şarj noktasına 1 kilometre mesafede yaşamaktadır.

Genel olarak, elektrikli otomobilleri erken benimseyenlerin, genel nüfusa kıyasla evde şarj imkanına daha yüksek oranda erişimi olduğu gözlenmiştir. 2030 yılında küresel elektrikli hafif ticari araç stokunun %15'ini temsil etmesine rağmen uygun fiyatlı ve kullanışlı olması nedeniyle, evde şarjın elektrikli araç şarjı için tercih edilen yöntem olmaya devam etmesi beklenmektedir. İş yerleri gibi diğer özel yerlerde ve kamuya açık şarj istasyonlarında şarj imkanının bulunması da özellikle evde şarj imkanına sahip olmayan veya uzun mesafeler kat eden nüfus arasında elektrikli araçların daha yaygın olarak benimsenmesini destekleyecektir. Genel olarak, EV pazarları olgunlaştıkça, kamuya açık şarj ağının optimizasyonunun iyileşmesi beklenmekte, bu da kullanım oranının kullanıcı deneyimi üzerinde olumsuz bir etki yaratmadan artabileceği anlamına gelmektedir.

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR ve BATARYA

Enerji sektöründe hem elektrikli araç bataryaları hem de depolama uygulamaları için batarya talebi, 2024 yılında 1 TWh'lik tarihi bir dönüm noktasına ulaşmıştır. 2024 yılında ki ortalama bir haftalık talep, on yıl öncesine göre tüm yıl boyunca toplam talebi aşmıştır. Elektrikli araç bataryalarına olan talep 950 GWh'nin üzerine çıkmıştır. Elektrikli otomobiller, %85'in üzerinde bir payla elektrikli araç batarya talebinin arkasındaki en önemli faktör olmaya devam

etmektedir. 2023 yılına kıyasla, talebi en çok artan sektör ise elektrikli kamyonlar oldu ve 2024 yılında %75'in üzerinde bir artışla küresel elektrikli araç batarya talebinin yaklaşık %3'üne ulaşmıştır. Elektrikli kamyon batarya talebi Çin'deki büyümeden kaynaklanırken, Avrupa'da da talep artışı yaşandı (yaklaşık %25) ve bu da küresel toplamın yaklaşık %10'unu oluşturmaktadır (IEA, 2025).



Şekil 2. Elektrikli araç batarya talebi, model türüne göre, 2018-2024 (IEA, 2025)

Elektrikli araçlarda birincil enerji depolama bileşeni olarak bataryalar görev yapmakta ve çekiş motoruna ve yardımcı sistemlere elektrik enerjisi sağlamaktadır. Bir elektrikli aracın performansı, enerji yoğunluğu, güç yoğunluğu, çevrim ömrü, şarj kapasitesi ve termal kararlılık gibi batarya özelliklerinden doğrudan etkilenmektedir. Yüksek enerji yoğunluğu daha uzun sürüş menzilleri sağlarken, yüksek güç yoğunluğu hızlı ivmelenmeyi ve rejeneratif frenlemeyi desteklemektedir. Ayrıca, batarya dayanıklılığı ve güvenliği, uzun vadeli güvenilirlik ve kullanıcı kabulünü sağlamada kritik faktörlerdir (Plett, 2015; Manzetti & Mariasi, 2015).

Elektrikli Araçlarda Kullanılan Batarya Teknolojileri

Lityum İyon Bataryalar

Günümüzde, lityum iyon (Li-ion) bataryalar, üstün enerji yoğunluğu, nispeten uzun çevrim ömrü ve yüksek verimlilikleri nedeniyle elektrikli araç pazarında hakim konumdadır. Elektrikli araçlarda kullanılan yaygın Li-ion kimyaları arasında lityum nikel mangan kobalt oksit (NMC), lityum nikel kobalt alüminyum oksit (NCA) ve lityum demir fosfat (LFP) bulunmaktadır. NMC ve

NCA piller uzun menzilli araçlar için uygun yüksek enerji yoğunluğu sunarken, LFP piller gelişmiş termal kararlılık, güvenlik ve daha uzun çevrim ömrü sağlayarak maliyet hassasiyeti yüksek uygulamalar için cazip hale gelmektedir (Tarascon & Armand, 2001).

Gelişen Pil Teknolojileri

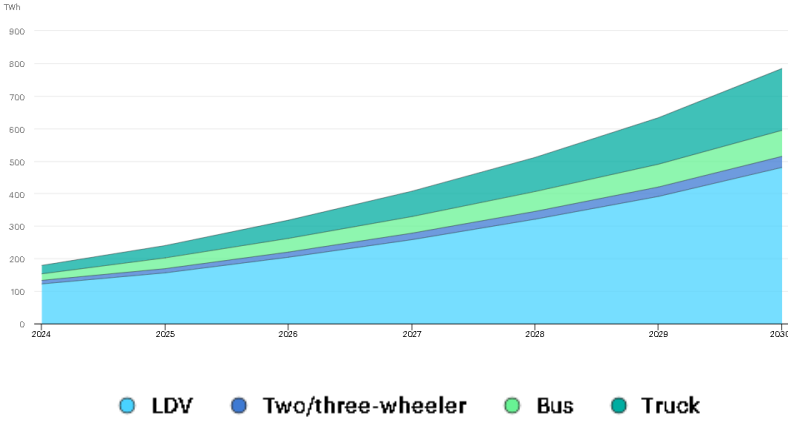
Geleneksel Li-ion pillerin sınırlamalarının üstesinden gelmek için, katı hal piller, lityum-kükürt piller ve lityum-hava piller gibi yeni nesil pil teknolojilerine önemli araştırma çalışmaları odaklanmaktadır. Özellikle katı hal piller, sıvı elektrolitleri katı elektrolitlerle değiştirerek gelişmiş güvenlik, daha yüksek enerji yoğunluğu ve termal kaçış riskinin azalmasını sunmaktadır. Umut vadeden özelliklerine rağmen, malzeme arayüzleri, üretim ölçeklenebilirliği ve maliyetle ilgili zorluklar şu anda büyük ölçekli ticarileşmeyi kısıtlamaktadır (Zhang vd., 2020).

Önemli ilerlemelere rağmen, elektrikli araçlar için batarya geliştirme alanında çeşitli zorluklar devam etmektedir. Bunlar arasında yüksek üretim maliyetleri, kritik hammaddelerin sınırlı bulunabilirliği, geri dönüşüm ve çevresel kaygılar ile zamanla performans düşüşü yer almaktadır. Gelecekteki araştırma yönleri, enerji yoğunluğunu iyileştirmeye, kıt malzemelere bağımlılığı azaltmaya, geri dönüştürülebilirliği artırmaya ve bataryaları araç ve şebeke sistemleriyle daha etkili bir şekilde entegre etmeye odaklanmaktadır. Batarya teknolojisindeki gelişmelerin, yeni nesil elektrikli araçların geliştirilmesinde ve sürdürülebilir ulaşım küresel geçişin hızlandırılmasında çok önemli bir rol oynaması beklenmektedir.

ELEKTRİKLİ ARAÇ ve ENERJİ

2024 yılında, küresel elektrikli araç filosu yaklaşık 180 TWh elektrik tüketmiştir. Bu değer bir önceki yıla göre neredeyse %60 daha fazladır. Küresel düzeyde, elektrikli araçlar 2024 yılında nihai elektrik tüketiminin yaklaşık %0,7'sini temsil etmiştir.

Elektrikli araç sayısı 2030 yılına kadar üç kattan fazla artacağı öngörülmektedir, ancak elektrik talebi dört kattan fazla artarak 780 TWh'ye ulaşabilir. Bu artış, elektrikli kamyonlardan kaynaklanan artan tüketimin yanı sıra, insanların yılda daha fazla araç kullandığı pazarlarda elektrikli araç kullanımının artmasından kaynaklanmaktadır. 2030 yılında karayolu taşımacılığı için toplam enerji talebi sadece %5 artarken, toplam karayolu faaliyeti (kat edilen araç kilometreleri açısından) aynı dönemde yaklaşık %20 artmaktadır; bu da elektrikli araçların daha yüksek enerji verimliliğini yansıtmaktadır (IEA, 2025).



Şekil 3. Ulaşım Şekline Göre Elektrik Talebi, 2024-2030 (IEA, 2025)

Elektrikli araçlar, elektrik motorlarının ve güç elektroniğinin yüksek verimliliği nedeniyle geleneksel araçlara göre doğal olarak enerji verimlidir. İçten yanmalı motorlar genellikle yakıt enerjisinin yalnızca %20-30'unu faydalı mekanik işe dönüştürürken, elektrikli tahrik sistemleri %85'in üzerinde verimlilik sağlanmaktadır. Yine rejeneratif frenleme sistemleri, elektrikli araçların yavaşlama sırasında kinetik enerjiyi geri kazanmasını sağlayarak genel enerji kullanımını daha da iyileştirmektedir (Ehsani vd., 2018).

Enerji tüketimi açısından bakıldığında, elektrikli araçlar benzinli veya dizel araçlara kıyasla kilometre başına önemli ölçüde daha az birincil enerji gerektirmektedir. Bu verimlilik avantajı, ulaşım sektöründeki toplam enerji talebini azaltmada önemli bir rol oynamaktadır.

Avantajlarına rağmen, elektrikli araçlar için enerjiyle ilgili çeşitli zorluklar devam etmektedir. Bunlar arasında elektrik üretiminin karbon yoğunluğu, önemli şebeke altyapısı iyileştirmelerine duyulan ihtiyaç ve pil üretimi ve geri dönüşümüyle ilgili endişeler yer almaktadır. Gelecekteki araştırma ve politika çalışmaları, yenilenebilir enerji kullanımını hızlandırmaya, şebeke zekasını geliştirmeye ve pil teknolojilerinin sürdürülebilirliğini artırmaya odaklanmaktadır. Uzun vadede, elektrikli araçlar ve temiz enerji sistemleri arasındaki sinerjinin, küresel enerji geçişi ve iklim hedeflerine ulaşmada hayati bir rol oynaması beklenmektedir.

TARTIŞMA

Bu çalışmanın bulguları, özellikle şarj altyapısı, batarya teknolojileri ve enerji sistemlerinin birbirine bağlı boyutları üzerinden değerlendirildiğinde, elektrikli araçların sürdürülebilir ulaşım sistemlerine geçişte merkezi bir unsur olduğunu vurgulamaktadır. Yapılan değerlendirmeler, EV'lerin sürdürülebilirlik performansının izole olarak değerlendirilemeyeceğini; aksine, araç teknolojileri

ve daha geniş enerji ekosistemi arasındaki sistemik etkileşimlere büyük ölçüde bağlı olduğunu göstermektedir.

Şarj açısından, erişilebilir ve güvenilir şarj altyapısının genişlemesi, büyük ölçekli EV benimsenmesi için belirleyici bir faktör olmaya devam etmektedir. Hızlı ve ultra hızlı şarj teknolojilerindeki gelişmeler şarj sürelerini önemli ölçüde azaltmış olsa da yaygın kullanımları şebeke kapasitesi, tepe talep ve batarya bozulmasıyla ilgili yeni zorluklar ortaya çıkarmaktadır (Hasan vd., 2021). Bu, şarjdaki teknolojik ilerlemenin, güç sistemleri üzerindeki olumsuz etkileri azaltmak için akıllı şarj ve talep yanıt mekanizmaları gibi akıllı enerji yönetim stratejileriyle birlikte yürütülmesi gerektiğini göstermektedir.

Batarya teknolojisi, elektrikli mobilite için hem önemli bir kolaylaştırıcı hem de sınırlayıcı bir faktör olmaya devam etmektedir. Enerji yoğunluğundaki iyileşmeler, maliyet düşüşü ve çevrim ömrü, araç menzilin ve uygun fiyatlılığını artırarak, geleneksel araçlara kıyasla elektrikli araçların rekabet gücünü güçlendirmiştir. Bununla birlikte, hammadde bulunabilirliği, pil üretiminin çevresel etkileri ve kullanım ömrü sonu yönetimi ile ilgili endişeler kritik önem taşımaktadır. Tartışma, etkili geri dönüşüm sistemleri ve kritik malzemelere bağımlılığı azaltılmış yeni nesil pillerin geliştirilmesi olmadan, elektrikli araçların uzun vadeli sürdürülebilirlik faydalarının sınırlı kalabileceğini göstermektedir (Eberle & Von Helmolt, 2010).

Enerji üretiminin rolü, elektrikli araçların genel çevresel performansını belirlemede eşit derecede önemlidir. Elektrikli araçlar araç düzeyinde üstün enerji verimliliği sergilese de yaşam döngüsü emisyonları elektrik üretiminin karbon yoğunluğuyla yakından bağlantılıdır. Sonuçlar, elektrikli araçların düşük karbonlu ve yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegrasyonunun, emisyon azaltma hedeflerine katkılarını önemli ölçüde artırdığını vurgulamaktadır (Larminie & Lowry, 2012). Ayrıca, araçtan şebekeye (V2G) teknolojilerinin ortaya çıkması, elektrikli araçların şebeke istikrarını ve yenilenebilir enerji entegrasyonunu destekleyen dağıtılmış enerji depolama varlıkları olarak işlev görmesi için bir fırsat sunmaktadır. Bununla birlikte, bu potansiyeli tam olarak gerçekleştirmek için düzenleyici engeller, pazar tasarımı sınırlamaları ve kullanıcı kabul sorunları ele alınmalıdır.

Genel olarak, tartışma, elektrikli araçların sadece ulaşım araçları olarak değil, entegre ve akıllı bir enerji ulaşım sisteminin aktif bileşenleri olarak görülmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

SONUÇ

Bu çalışma, şarj teknolojileri, batarya sistemleri ve enerji entegrasyonu çerçevesinde elektrikli araçların sürdürülebilir ulaşım sistemlerindeki rolünü incelemiştir. Analiz, elektrikli araçların geleneksel içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla enerji verimliliği, emisyon azaltımı ve sistem düzeyinde esneklik

açısından önemli avantajlar sunduğunu doğrulamaktadır. Bununla birlikte, bu faydalar büyük ölçüde destekleyici altyapıya, teknolojik gelişmelere ve temiz enerji entegrasyonuna bağlıdır.

Bulgular, elektrikli mobilitenin sürdürülebilirliğinin birbirine bağlı üç temel üzerine kurulu olduğunu göstermektedir. Birincisi, şebeke ile ilgili zorlukları en aza indirirken kullanıcı kolaylığını sağlamak için verimli, standartlaştırılmış ve akıllı şarj altyapısının geliştirilmesi şarttır. İkincisi, ekonomik ve çevresel endişeleri gidermek için batarya teknolojilerinde sürekli yenilik, sorumlu malzeme tedariki ve etkili geri dönüşüm stratejileri gereklidir. Üçüncüsü, elektrik üretiminin karbondan arındırılması ve akıllı enerji yönetim sistemlerinin uygulanması, elektrikli araçların çevresel faydalarını en üst düzeye çıkarmak için kritik öneme sahiptir.

Sonuç olarak, elektrikli araçlar sürdürülebilir ulaşım da dönüştürücü bir rol oynama potansiyeline sahiptir, ancak başarıları bütüncül ve sistem odaklı bir yaklaşım gerektirmektedir. Gelecekteki araştırmalar, entegre enerji-ulaşım modellemesi, akıllı şarj ve V2G sistemlerinin gerçek dünya değerlendirmeleri ve ulaşım elektrifikasyonunu yenilenebilir enerji kullanımıyla uyumlu hale getiren politika çerçevelerine odaklanmalıdır. Bu zorlukların koordineli bir şekilde ele alınmasıyla, elektrikli araçlar dayanıklı, düşük karbonlu ve sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin geliştirilmesine önemli ölçüde katkıda bulunabilir.

KAYNAKLAR

- IEA. (2025). *Global EV Outlook*. International Energy Agency.
- Ekwuribe, B., & Poi, E. L. (2025). The Role of Electric Vehicles in Enhancing Sustainable Transportation In Nigeria. *BW Academic Journal*.
- Banister, D. (2008). The sustainable mobility paradigm. *Transport policy*, 15(2), 73-80.
- Hawkins, T. R., Singh, B., Majeau-Bettez, G., & Strømman, A. H. (2013). Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. *Journal of industrial ecology*, 17(1), 53-64.
- Curry, C. (2017). Lithium-ion battery costs and market. *Bloomberg New Energy Finance*, 5(4-6), 43.
- Hemavathi, S., & Shinisha, A. (2022). A study on trends and developments in electric vehicle charging technologies. *Journal of energy storage*, 52, 105013.
- Rezvani, Z., Jansson, J., & Bodin, J. (2015). Advances in consumer electric vehicle adoption research: A review and research agenda. *Transportation research part D: transport and environment*, 34, 122-136.
- Sierzechula, W., Bakker, S., Maat, K., & Van Wee, B. (2014). The influence of financial incentives and other socio-economic factors on electric vehicle adoption. *Energy policy*, 68, 183-194.
- Ellingsen, L. A. W., Singh, B., & Strømman, A. H. (2016). The size and range effect: lifecycle greenhouse gas emissions of electric vehicles. *Environmental Research Letters*, 11(5), 054010.
- Bauer, C., Hofer, J., Althaus, H. J., Del Duce, A., & Simons, A. (2015). The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life cycle assessment based on a novel scenario analysis framework. *Applied energy*, 157, 871-883.
- Hawkins, T. R., Singh, B., Majeau-Bettez, G., & Strømman, A. H. (2013). Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. *Journal of industrial ecology*, 17(1), 53-64.
- Mi, C., & Masrur, M. A. (2025). *Hybrid electric vehicles: principles and applications with practical perspectives*. John Wiley & Sons.
- Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S., & Ebrahimi, K. (2018). *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles*. CRC press.
- Ogden, J. M., Williams, R. H., & Larson, E. D. (2001). Toward a hydrogen-based transportation system. *Princeton University, Center for Energy & Environmental Studies, Princeton, New Jersey*.

- Zhang, Z., Shao, Y., Lotsch, B., Hu, Y. S., Li, H., Janek, J., ... & Chen, L. (2018). New horizons for inorganic solid state ion conductors. *Energy & Environmental Science*, 11(8), 1945-1976.
- Millan, J., Godignon, P., Perpiñà, X., Pérez-Tomás, A., & Rebollo, J. (2013). A survey of wide bandgap power semiconductor devices. *IEEE transactions on Power Electronics*, 29(5), 2155-2163.
- Plett, G. L. (2015). *Battery management systems, Volume I: Battery modeling*. Artech House.
- Pesaran, A. A., & Keyser, M. (2001, January). Thermal characteristics of selected EV and HEV batteries. In *Sixteenth Annual Battery Conference on Applications and Advances. Proceedings of the Conference (Cat. No. 01TH8533)* (pp. 219-225). IEEE.
- Kempton, W., & Tomić, J. (2005). Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue. *Journal of power sources*, 144(1), 268-279.
- Yilmaz, M., & Krein, P. (2012, March). Review of charging power levels and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles and commentary on unidirectional charging. In *IEEE international electrical vehicle conference*.
- Clement-Nyns, K., Haesen, E., & Driesen, J. (2009). The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid. *IEEE Transactions on power systems*, 25(1), 371-380.
- Bi, Z., Kan, T., Mi, C. C., Zhang, Y., Zhao, Z., & Keoleian, G. A. (2016). A review of wireless power transfer for electric vehicles: Prospects to enhance sustainable mobility. *Applied energy*, 179, 413-425. Tarascon, J. M., &
- Tarascon, J-M., and Michel Armand. "Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries." *nature* 414.6861 (2001): 359-367.
- Öztürk, S., & İbik, T. (2025). Elektrikli Araç Teknolojisi, Ekonomi Ve Ulaşım Sektörü: Doğu Anadolu Bölgesi Örneği. *Yönetim Bilimleri Dergisi*, 23(55), 432-456.
- Zhao, J., Shi, J., & Zhuo, L. (2024). BEV perception for autonomous driving: State of the art and future perspectives. *Expert Systems with Applications*, 258, 125103.
- Farmer, C., Hines, P., Dowds, J., & Blumsack, S. (2010, January). Modeling the impact of increasing PHEV loads on the distribution infrastructure. In *2010 43rd Hawaii International Conference on System Sciences* (pp. 1-10). IEEE.
- Manzetti, S., & Mariasiu, F. (2015). Electric vehicle battery technologies: From present state to future systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1004-1012.

Hasan, M. K., Mahmud, M., Habib, A. A., Motakabber, S. M. A., & Islam, S. (2021). Review of electric vehicle energy storage and management system: Standards, issues, and challenges. *Journal of energy storage*, 41, 102940.

Eberle, U., & Von Helmolt, R. (2010). Sustainable transportation based on electric vehicle concepts: a brief overview. *Energy & Environmental Science*, 3(6), 689-699.

Larminie, J., & Lowry, J. (2012). *Electric vehicle technology explained*. John Wiley & Sons.

BÖLÜM 43

Ağlarda Merkezi Düğümler: Temel Kavramlar ve Uygulama Alanları

Onur Uğurlu¹

¹ Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İzmir Bakırçay Üniversitesi, İzmir, TÜRKİYE, ORCID: 0000-0003-2743-5939

GİRİŞ

Günümüzde pek çok sistem, birbirine bağlı bileşenlerden oluşan bir yapı üzerinden işler: insanların iletişim ve etkileşim ağları, şehir içi ulaşım hatları, internet omurgası ve kurumsal bilgisayar ağları, enerji iletim/dağıtım altyapıları, hatta biyolojik etkileşim ağları bunların en bilinen örnekleridir. Bu tür yapılarda “hangi bileşen daha önemli?”, “hangi nokta daha fazla yük taşır?”, “hangi düğümün devre dışı kalması daha geniş etki doğurur?” gibi sorular, yalnızca akademik merakla sınırlı değildir; planlama, işletim, bakım önceliği ve risk yönetimi gibi pratik ihtiyaçlara doğrudan karşılık gelir. Nitekim ağın bütünlüğü ve dayanıklılığı gibi yapısal özellikleri incelemek için “önemli elemanların” belirlenmesi temel bir araç olarak görülür; bu yaklaşımın iç güvenlik, ulaşım ve enerji gibi sektörlerde uygulama karşılığı olduğu da sıklıkla vurgulanır (Saxena vd., 2020).

Ağ (çizge) bakış açısı, bu sorulara sistemin “ilişki yapısı” üzerinden yanıt arar. Bir sistemi düğümler (varlıklar) ve kenarlar (ilişkiler) ile temsil ettiğimizde, bazı düğümlerin ağ içinde daha merkezi bir rolde olduğu fark edilir. Buradaki merkezilik, yalnızca geometrik bir ortada durma durumu değildir; daha çok, seçilen bakış açısına göre değişen yapısal bir görünürlük/erişim/aracılık anlamı taşır. Örneğin bazı düğümler çok sayıda başka düğümlle doğrudan bağlantılıdır; bazıları ağıdaki farklı gruplar arasında köprü görevi görür; bazıları ise ağın geri kalanına ortalama olarak daha kısa yollarla erişebilir. Merkezilik kavramının bu farklı sezgiler üzerinden ele alınması literatürde klasikleşmiş bir yaklaşımdır; merkeziliğin tek bir tanıma indirgenemeyeceği, farklı merkezilik türlerinin farklı yorumlara karşılık geldiği erken dönem çalışmalardan itibaren tartışılmıştır.

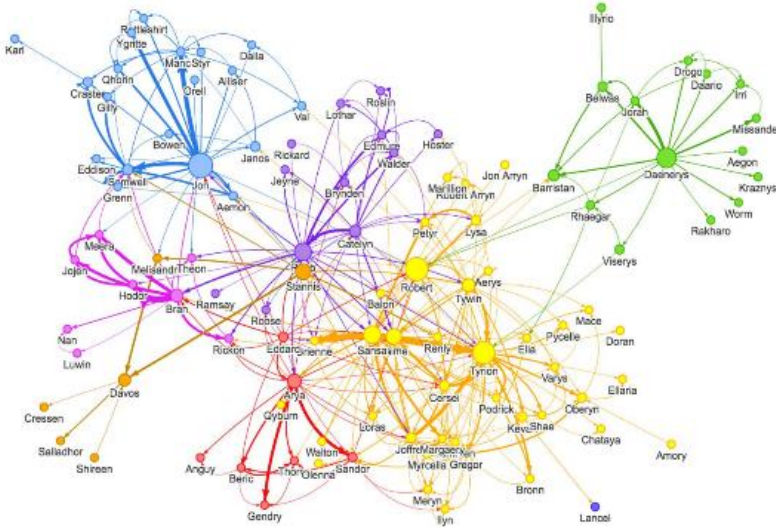
Bununla birlikte, merkezilik sonuçlarının doğrudan en önemli düğüm hükmü olarak okunması her zaman doğru değildir. Merkezilik, seçilen ölçüte ve ağı nasıl modellendiğine bağlı bir göstergedir; aynı ağ üzerinde farklı merkezilik ölçütleri farklı düğümleri öne çıkarabilir. Bu nedenle merkezilik analizi, çoğu durumda nihai kararın kendisi değil, karar sürecini destekleyen bir ön değerlendirme aracı olarak ele alınmalıdır. Sonuçların alan bilgisiyle birlikte yorumlanması ve mümkün olduğunda ek göstergelerle doğrulanması gerekir.

Bu bölüm, merkezi düğüm kavramını temel sezgileriyle sunmayı ve farklı uygulama alanlarında nasıl kullanıldığını özetlemeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda, önce ağların temel bileşenleri kısaca tanımlanacak, ardından merkezilik ölçütleri kavramsal olarak açıklanacaktır. Devamında sosyal ağlar, ulaşım ağları, telekomünikasyon/bilgisayar ağları, enerji/altyapı ağları ve biyolojik ağlar üzerinden merkezilik yaklaşımının pratik karşılığı kısa örneklerle ele alınacaktır. Son olarak, merkezilik sonuçlarının yorumlanmasına ilişkin temel dikkat noktaları kısaca belirtilecek ve bölüm tamamlanacaktır.

TEMEL KAVRAMLAR

Ağ, bir sistemdeki bileşenleri ve bu bileşenler arasındaki ilişkileri birlikte ifade eden temel bir modeldir. Ağ yapısında bileşenler düğüm, düğümler arasındaki bağlar ise kenar ile gösterilir. Düğüm, kişi, kurum, cihaz, istasyon, kavşak, trafo, biyolojik birim gibi farklı varlıkları temsil edebilir. Kenar ise bu varlıklar arasındaki etkileşim, bağlantı, geçiş, akış veya ilişkiyi ifade eder. Bu temsil, farklı alanlardaki sistemleri ortak bir dil ile ele almayı mümkün kılar.

Ağlar, ilişkinin niteliğine göre farklı biçimlerde sınıflandırılabilir. Yönsüz ağlarda ilişki iki yönlü kabul edilir; bir düğümden diğerine geçiş veya etkileşim yön bilgisi taşımaz. Yönlü ağlarda ise kenar bir yön içerir ve ilişki A'dan B'ye biçiminde tanımlanır. Örneğin sosyal medyada takip etme ilişkisi veya veri akışının belirli bir yönde gerçekleştiği ağlar yönlü yapıya örnektir. Bunun yanında kenarlar ağırlıksız ya da ağırlıklı olabilir. Ağırlık, kenarın taşıdığı etki, kapasite, maliyet, mesafe veya sıklık gibi büyüklükleri temsil eder. Böylece aynı ağ yapısı, yalnızca bağ var/yok düzeyinde değil, ilişkinin gücünü de dikkate alacak biçimde modellenilebilir. Şekil 1'de Taht Oyunları kitabındaki karakterler üzerinden modellenen bir çizge görseli verilmiştir.



Şekil 1. Taht oyunları karakterleri üzerinden modellenen çizge (Beveridge ve Shan, 2016).

Uygulamada ağın nasıl kurulduğu, analizin sonucunu doğrudan etkiler. Hangi varlıkların düğüm seçileceği, hangi ilişkinin kenar olarak kabul edileceği ve ilişkinin yön/ağırlık gibi özelliklerle temsil edilip edilmeyeceği, probleme göre belirlenir. Bu nedenle ağ modellemesi, merkezilik analizinden önce gelen temel bir adımdır. Aynı sistem farklı düzeylerde temsil edilebilir; örneğin ulaşım ağında

düğümlemler istasyonlar olarak da kavşaklar olarak da seçilebilir. Benzer biçimde kurumsal ağlarda düğüm, kişi düzeyinde de birim düzeyinde de tanımlanabilir. Seçilen temsil, daha sonra hesaplanan merkezilik değerlerini ve merkezi düğüm yorumunu belirler.

Notasyon ve temel tanımlar

$G(V,E)$ bir çizge olmak üzere, V kümesi çizgedeki düğümleri, E kümesi ise çizgedeki kenarları temsil etmektedir. Ayrıca $n = |V|$ çizgedeki düğüm sayısını, $m = |E|$ ise çizgedeki kenar sayısını ifade etmektedir. Çizgedeki kenarlar yalnızca düğümler arasındaki bir ilişkinin olup olmadığını gösteriyorsa (0/1) bu çizgeler ağırlıksız (unweighted), kenarlar sayısal değerlere sahipse bu çizgeler ağırlıklı (weighted) çizge olarak adlandırılır. Bir düğüm $v \in V$ için v 'nin komşuları $N(v)$ ile gösterilsin. Yönsüz bir çizgede v 'nin derece değeri, $deg(v) = |N(v)|$ şeklinde tanımlanır. Yönlü çizgelerde ise derecenin iki bileşeni kullanılır: gelen derece (in-degree) ve giden derece (out-degree). Gelen derece, v 'ye yönelen kenar sayısını; giden derece ise v 'den çıkan kenar sayısını ifade eder (Diestel, 2012).

İki düğüm u ve v arasındaki bir yol (path), ardışık düğüm çiftlerinin bir kenarla bağlı olduğu bir düğüm dizisidir. Bu yolun uzunluğu, ağırlıksız çizgelerde genellikle yoldaki kenar sayısı olarak alınır. Ağırlıklı çizgelerde ise bir ağırlık fonksiyonu üzerinden yol uzunluğu, yol üzerindeki kenar ağırlıklarının toplamı olarak tanımlanır. u ve v düğümleri arasındaki mesafe $d(u,v)$, u 'dan v 'ye giden tüm yollar içinde uzunluğu en küçük olan yolun uzunluğu olarak tanımlanır. Bu en küçük uzunluğu sağlayan yol ise en kısa yol (shortest path) olarak adlandırılır. Eğer u ile v arasında hiçbir yol yoksa, $d(u,v)$ tanımsız kabul edilebilir ya da uygulamaya bağlı olarak sonsuz olarak ele alınabilir (Diestel, 2012).

MERKEZİYET ÖLÇÜTLERİ

Bu bölümde, bir düğümün ağ yapısı içindeki konumunu nicel olarak ifade etmek için kullanılan merkeziyet ölçütleri (centrality measures) ele alınmaktadır. Merkeziyet ölçütleri tek bir önem tanımı sunmaz; her ölçüt farklı bir yapısal sezgiyi yakalamayı amaçlar (Freeman, 1979; Newman, 2010). Bu çalışmada derece, aradalık ve yakınlık merkeziyeti ele alınmıştır.

Derece merkeziyeti

Derece merkeziyeti (degree centrality), bir düğümün doğrudan bağlantı düzeyini ifade eder (Wasserman ve Faust, 1994). Yönsüz çizgelerde bir düğümün derecesi $deg(v)$ komşu sayısıdır. Karşılaştırılabilirlik için derece merkeziyeti çoğunlukla normalize edilerek kullanılır:

$$DC_v = \frac{deg(v)}{n-1} \quad (1)$$

Yönlü çizgelerde doğrudan bağlantı iki bileşenle değerlendirilir: gelen derece ve giden derece. Bu durumda derece merkeziet değeri uygulamaya bağılı olarak gelen/giden derece üzerinden ayrı ayrı hesaplanabilir.

Aradalık merkeziet

Aradalık merkeziet (betweenness centrality), bir düğümün ağ içinde aracı/köprü rolünü ölçmeyi amaçlar (Brandes, 2001). Bu ölçütte temel fikir, düğümün diğer düğüm çiftleri arasındaki en kısa yollar üzerinde ne ölçüde yer aldığıdır. s ve t düğümleri arasındaki en kısa yol sayısı σ_{st} , bu yollardan v düğümünden geçenlerin sayısı $\sigma_{st}(v)$ olmak üzere aradalık merkeziet aşağıdaki biçimde tanımlanır:

$$BC_v = \sum_{s \neq v \in V} \sum_{t \neq v \neq s \in V} \frac{\sigma_{st}(v)}{\sigma_{st}} \quad (2)$$

Uygulamalarda, düğüm sayısına bağılı ölçek etkisini azaltmak amacıyla BC_v değeri normalize edilerek raporlanabilir. Normalizasyon tercihleri yönlü/yönsüz çizgeye göre değişebildiğinden, kullanılan raporlama biçimi metinde açıkça belirtilmelidir.

Yakınlık merkeziet

Yakınlık merkeziet (closeness centrality), bir düğümün ağdaki diğer düğümlere ortalama erişim uzaklığı üzerinden ne kadar yakın olduğunu ifade eder (Evans ve Chen, 2022). v düğümünün diğer tüm düğümlere olan en kısa yol mesafelerinin toplamı kullanılarak aşağıdaki biçimde tanımlanır:

$$CC_v = \frac{n-1}{\sum_{u \neq v \in V} d(v,u)} \quad (3)$$

Bu tanım, özellikle çizgenin büyük ölçüde bağılı olduğu durumlarda doğrudan yorumlanabilir. Çizgenin bağılı olmadığı durumlarda ise, erişilemeyen düğümler için mesafe tanımsız olacağından, yakınlık merkeziet hesaplanırken yalnızca erişilebilir düğümler kümesi üzerinden değerlendirme yapılması veya uygulamaya uygun bir hesaplama kuralının belirtilmesi gerekir.

UYGULAMA ALANLARI

Merkeziet ölçütleri çoğu zaman tek başına karar vermez; daha çok, geniş bir ağın içinde ilk bakılacak yerleri daraltır. Derece, aradalık ve yakınlık ölçütleri farklı sorulara karşılık gelir. Bu nedenle uygulamada iki adım önemlidir: Önce ağın nasıl kurulduğu netleştirilir (düğüm neyi temsil ediyor, kenar hangi ilişkiyi gösteriyor, yön/ağırlık var mı?), ardından merkeziet değerleri bu tanımın sınırları içinde yorumlanır. Örneğin aynı sistem, ağırlıksız ele alındığında “bağ var/yok” üzerinden; ağırlıklı ele alındığında “maliyet/süre/kapasite” üzerinden

farklı bir yapı ortaya koyabilir. Sonuçta merkezilik sıralaması da değişir. Bu durum bir hata değildir; yalnızca farklı soruların farklı göstergeler gerektirdiğini gösterir.

Sosyal ağlar

Sosyal ağlarda düğümler genellikle kişiler, kurumlar veya hesaplar; kenarlar ise takip, iletişim, etkileşim ya da ortak etkinlik gibi ilişkileri temsil eder. Bu tür ağlarda derece merkeziyeti, “kim daha çok kişiyle doğrudan temas ediyor?” sorusunu öne alır. Örneğin bir duyurunun hızlı yayılması isteniyorsa, doğrudan erişim alanı geniş düğümler doğal adaylar haline gelir. Burada avantaj şudur: derece merkeziyeti basit bir ölçüttür ve çoğu veri setinde hızlıca hesaplanıp yorumlanabilir. Dezavantajı ise, bağlantının niteliğini her zaman ayırt edememesidir; çok sayıda zayıf etkileşimle az sayıda güçlü etkileşim aynı düzeyde görünebilir (Valente ve Pumpuang, 2007).

Sosyal ağlarda asıl mesele bazen çok kişiye ulaşmak değil, farklı gruplara ulaşmak olur. Bu durumda aradalık merkeziyeti daha anlamlı hale gelir; çünkü topluluklar arasında köprü gibi çalışan düğümler, bilgi akışının yön değiştirdiği geçiş noktaları olabilir. Küçük ama önemli bir ayrıntı vardır: köprü rolü çoğu zaman bağlantı sayısıyla aynı şey değildir. Çok bağlantılı bir düğüm, sadece kendi grubunun içinde yoğunlaşabilir; aradalığı yüksek bir düğüm ise az bağlantıyla iki grubu birbirine bağlayabilir. Bu yüzden sosyal ağlarda derece ile aradalık birlikte incelendiğinde, kalabalıkların içindeki merkez ile kalabalıkları birbirine bağlayan merkez ayrımı daha net görünür.

Yakınlık merkeziyeti sosyal ağlarda her zaman birincil ölçüt olarak kullanılmasa da özellikle ağıın geneline hızlı erişim fikrinin önemli olduğu durumlarda işe yarar. Bir hesap, farklı topluluklara çok az adımda erişebiliyorsa, duyuru veya koordinasyon gibi süreçlerde hızlı temas sağlayabilir. Bununla birlikte sosyal ağlar çoğu zaman tam bağlı değildir; erişilemeyen alt kümeler bulunabilir. Bu nedenle yakınlık yorumlanırken ağıın bağlılık yapısına dikkat edilir.

Ulaşım ağları

Ulaşım ağlarında düğüm olarak istasyon, durak, kavşak veya terminal seçilir; kenarlar da yol, hat ya da bağlantı olarak tanımlanır. Böyle ağlarda aradalık merkeziyeti çoğu zaman aktarma niteliği taşıyan düğümleri öne çıkarır. Basitçe söylemek gerekirse: birçok güzergâhın en kısa yolu aynı noktada kesişiyorsa, o düğüm ağ içinde bir geçiş düğümüne dönüşür. Bu düğümler, yoğun saatlerde tıkanma, gecikme birikimi veya hizmet kesintisinin yayılması gibi etkiler açısından da pratikte dikkat çeker (Crucitti vd., 2006).

Derece merkeziyeti ulaşım ağlarında genellikle “kaç farklı hat/bağlantı buraya geliyor?” sorusuna karşılık gelir. Çok bağlantılı istasyonlar ya da kavşaklar, topolojik düzeyde bir çekim noktası gibi görünür. Ancak ulaşımında her bağlantı

aynı etkiye sahip değildir; aynı sayıda bağlantısı olan iki düğümden biri, çok daha düşük kapasiteyle çalışıyor olabilir. Bu yüzden derece, çoğu zaman ilk bakış için kullanılır; karar verdirici ölçüt, genellikle ağırlıklar (süre, kapasite, maliyet) devreye girince ortaya çıkar.

Yakınlık merkeziyeti ise farklı bir sezgi taşıır: Bir düğümün ağıın geneline ortalama olarak daha kısa yollardan ulaşabilmesi. Bu tür bir düğüm, hizmet/erişim planlamasında genelin ortasına yakın bir konum gösterebilir. Örneğın yeni bir servis noktası, kontrol merkezi veya aktarma düzenlemesi yapılacaksa, yakınlık merkeziyeti yüksek düğümler aday havuzunu daraltabilir. Burada yine ağıın ağırlıklı mı ağırlıksız mı kurulduğıu kritik hale gelir. Ulaşım uygulamalarında en kısa yol, kenar sayısı ya da zamana göre belirlenebilir. Bu seçim, merkeziyet sonuçlarını doğrudan değıştirir.

Son olarak, ulaşım ağlarının mekânsal kısıtlar taşıdığıı unutulmamalıdır. Sosyal ağlardaki gibi rastgele bağlantılanma yoktur; coğrafya, maliyet ve planlama kararları bağlantıları sınırlar. Bu nedenle merkezilik sonuçları yorumlanırken fiziksel gerçekliğın ve işletim koşullarının doğal bir filtre oluşturduğıu kabul edilir.

Telekomünikasyon ve bilgisayar ağları

Telekomünikasyon ve bilgisayar ağlarında düğümler yönlendirici, anahtar, baz istasyonu veya sunucu gibi bileşenlerdir; kenarlar ise bağlantı ya da iletişim ilişkisidir. Derece merkeziyeti burada çok bağlantılı düğümleri öne çıkarır. Bu tip düğümler, topolojik olarak yoğun bağlantı noktalarıdır ve özellikle ağıın kenar–omurga ayrımında omurgaya yakın düğümler daha yüksek dereceye sahip olabilir. Pratikte bu düğümlerin izlenmesi, kapasite planlaması veya yük dengeleme kararları açısından anlamlı bir başlangıç noktası sunar (Albert vd., 2000).

Aradalık merkeziyeti ise daha çok trafik geçişı sezgisiyle ilişkilidir. Ağıın farklı kısımları arasında geçişin belirli düğümlerde yoğunlaşması, bu düğümleri operasyonel açıdan görünür kılabılır. Örneğın iki alt ağ arasında sınırlı sayıda geçiş varsa, bu geçiş düğümleri aradalık açısından yükselebilir. Bu tür düğümler, kesinti durumunda ağıın parçalanması veya gecikmenin yayılması gibi etkiler açısından da incelenir. Yine de burada önemli bir uyarı gerekir: gerçek iletişim ağlarında trafik her zaman en kısa yol üzerinden gitmez; yönlendirme protokolleri, politika kuralları ve yedeklilik mekanizmaları devrededir. Bu nedenle aradalık merkeziyeti, çoğu zaman teorik geçiş yoğunluğu fikrini temsil eder ve sonuçlar pratik işletim verileriyle birlikte ele alınır.

Yakınlık merkeziyeti telekomünikasyon uygulamalarında, özellikle ortalama gecikmeye yakınlık gibi bir sezgiyle ilişkilendirilebilir. Ağıın geneline daha kısa yol mesafesi olan düğümler, bazı servis yerleşimi (belirli hizmet düğümleri) senaryolarında aday olabilir. Ancak gecikme, yalnızca topolojik mesafeye bağlı

değildir; bant genişliği, kuyruklanma, fiziksel mesafe ve protokol davranışı gibi unsurlar belirleyicidir. Bu yüzden yakınlık ölçütü de çoğu zaman ilk tarama düzeyinde kalır.

Enerji ve kritik altyapı ağları

Enerji iletim/dağıtım ağları ve benzeri altyapılar (su, doğal gaz vb.) ağ olarak modellendiğinde, merkezilik ölçütleri çoğunlukla “risk açısından nerelere öncelik verelim?” sorusuna yaklaşmak için kullanılır. Örneğin çok sayıda alt bileşenle ilişkili olan düğümler, derece merkeziyeti bakımından öne çıkabilir. Bu durum, pratikte çok noktaya hizmet veren düğümlerle ilişkilendirilebilir. Aradalık merkeziyeti ise, şebekenin iki bölgesi arasında geçişi sağlayan düğümleri işaret etme eğilimindedir; bu tür düğümler, belirli bölgeler arası aktarımın dar boğazı haline gelebilir (Crucitti vd., 2004).

Ancak kritik altyapılarda yalnızca topolojik bilgi çoğu zaman yetersizdir. Hat kapasitesi, yük, iletim sınırları ve işletim politikaları sonucun merkezindedir. Bu yüzden merkezilik analizi burada genellikle ön inceleme gibi çalışır: hangi bileşenler daha yakından ele alınmalı, hangi noktalarda ayrıntılı mühendislik analizi yapılmalı? Özellikle bakım planlama, izleme sensörlerinin konumlandırılması veya risk raporlaması gibi süreçlerde, merkezilik sıralaması pratik bir başlangıç sağlayabilir.

Kritik altyapı ağlarında verinin niteliği de önemlidir. Şebeke modelleri güncel değilse veya sahadaki değişimler modele yansımıyorsa, merkezilik değerleri gerçeği iyi temsil etmeyebilir. Bu nedenle altyapı ağlarında merkezilik çalışmaları, çoğu zaman güncel topoloji ve işletim verileriyle desteklenerek yürütülür.

Biyolojik ağlar

Biyolojik ağlarda düğümler gen, protein veya metabolit; kenarlar ise etkileşim olarak düşünülebilir. Bu ağlarda merkezilik çoğu zaman “hangi bileşenler daha fazla ilişki içinde?” ya da “hangi bileşenler farklı alt süreçleri birbirine bağlıyor?” sorularını gündeme getirir. Örneğin protein etkileşim ağlarında derece merkeziyeti yüksek proteinler, pek çok etkileşim içinde oldukları için araştırmacının dikkatini çeker. Aradalık merkeziyeti yüksek olan bileşenler ise, farklı alt modüller arasında bağlayıcı bir rol oynuyor olabilir (Jeong vd., 2001).

Biyolojik ağlarda merkezilik değerleri çoğunlukla aday üretmek için kullanılır. Yani sonuç, doğrudan “bu bileşen kesinlikle en önemlidir” demekten çok, deneysel doğrulama için bir öncelik listesi oluşturur. Bu yaklaşım özellikle büyük biyolojik ağlarda işe yarar; çünkü tüm bileşenleri aynı anda deneysel olarak sınamak çoğu zaman mümkün değildir.

Bunun yanında biyolojik ağlarda veri belirsizliği daha belirgin olabilir. Etkileşimler farklı kaynaklardan derlenir, ölçüm koşulları değişebilir ve bazı

ilişkiler eksik ya da hatalı kaydedilmiş olabilir. Bu nedenle merkezilik sonuçları yorumlanırken, ağın güvenilirliği ve kapsayıcılığı göz önünde bulundurulur. Merkezilik değerleri genellikle tek başına kanıt olarak değil, diğer biyolojik bulgularla birlikte değerlendirilen bir yapısal ipucu olarak ele alınır.

SONUÇ

Bu bölümde ağlarda merkezi düğüm kavramı, temel tanımlar ve üç yaygın merkeziyet ölçütü üzerinden ele alınmıştır. Derece merkeziyeti, düğümün doğrudan bağlantı düzeyini; aradalık merkeziyeti, ağ içinde aracı/köprü rolünü; yakınlık merkeziyeti ise diğer düğümlere ortalama erişim uzaklığını yansıtan bir gösterge olarak sunulmuştur.

Uygulama alanları kısmında sosyal ağlar, ulaşım ağları, telekomünikasyon/bilgisayar ağları, enerji/altyapı ağları ve biyolojik ağlar üzerinden merkezilik yaklaşımının pratik karşılığı özetlenmiştir. Genel olarak derece merkeziyetinin erişim ve bağlantı yoğunluğu, aradalık merkeziyetinin geçiş/aktarma noktaları, yakınlık merkeziyetinin ise ağ geneline hızlı erişim gibi ihtiyaçlarla ilişkilendirilebildiği görülmüştür. Bununla birlikte, merkezilik sonuçlarının her bağlamda doğrudan “en önemli düğüm” kararı olarak okunmasının uygun olmadığı da açıkça ortaya çıkmaktadır. Merkeziyet değerleri, ağın nasıl kurulduğuna (düğüm–kenar tanımı, yönlülük, ağırlıklandırma), veri kalitesine ve ağın bağlılık yapısına duyarlıdır. Bu nedenle uygulamada merkezilik analizi, çoğu zaman nihai karardan önce kullanılan bir ön değerlendirme ve aday belirleme aracı olarak konumlandırılmalıdır.

Sonuç olarak merkeziyet ölçütleri, farklı disiplinlerdeki ağların yapısal özelliklerini kısa ve yorumlanabilir göstergelere indirgeme imkânı sağlar. Bu yönüyle, büyük ölçekli sistemlerde “nereden başlanacağı” sorusuna işlevsel bir çerçeve sunar. Sağlıklı bir kullanım için temel öneri, önce analiz hedefini netleştirmek, ardından bu hedefle uyumlu merkeziyet ölçütünü seçmek ve elde edilen sonuçları alan bilgisi ile birlikte değerlendirmektir.

KAYNAKÇA

- Albert, R., Jeong, H., & Barabási, A.-L. (2000). Error and attack tolerance of complex networks. *Nature*, 406, 378–382.
- Beveridge, A., & Shan, J. (2016). Network of Thrones. *Math Horizons*, 23(4), 18–22.
- Brandes, U. (2001). A faster algorithm for betweenness centrality. *The Journal of Mathematical Sociology*, 25(2), 163–177.
- Crucitti, P., Latora, V., & Marchiori, M. (2004). Model for cascading failures in complex networks. *Physical Review E*, 69(4), 045104(R).
- Crucitti, P., Latora, V., & Porta, S. (2006). Centrality measures in spatial networks of urban streets. *Physical Review E*, 73(3), 036125.
- Diestel, R. (2012). *Graph Theory* (4. baskı). Springer. (Graduate Texts in Mathematics; 173).
- Evans, T. S., & Chen, B. (2022). Linking the network centrality measures closeness and degree. *Communications Physics*, 5(1), 172.
- Freeman, L. C. (1979). Centrality in social networks: Conceptual clarification. *Social Networks*, 1(3), 215–239.
- Jeong, H., Mason, S. P., Barabási, A.-L., & Oltvai, Z. N. (2001). Lethality and centrality in protein networks. *Nature*, 411(6833), 41–42.
- Newman, M. E. J. (2010). *Networks: An Introduction*. Oxford University Press.
- Saxena, A., Iyengar, S. S., & Gupta, D. (2020). A survey on centrality measures in complex networks. *arXiv:2011.07190*.
- Valente, T. W., & Pumpuang, P. (2007). Identifying opinion leaders to promote behavior change. *Health Education & Behavior*, 34(6), 881–896.
- Wasserman, S., & Faust, K. (1994). *Social Network Analysis: Methods and Applications*. Cambridge University Press.

BÖLÜM 44

Gri Belirsiz Faaliyet Süreli Proje Çizelgeleme Analizi

Remziye Buse İyigün¹ & Erdal Aydemir²

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi; Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı. ORCID No: 0009-0006-0989-2860

² Doç. Dr.; Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü. ORCID No: 0000-0003-4834-725X

GİRİŞ

Proje yönetimi açısından, bir projenin başarılı olarak tanımlanması, kapsam, zaman ve maliyet bileşenleri ile hedeflere ulaşılmasına bağlıdır. Ancak, günümüzün projeleri, geleneksel inşaat ve üretim projelerinden farklı olarak, yüksek teknoloji, çevik metodolojiler ve sürekli değişen pazar dinamikleri ile karakterize edilmektedir. Bu projelerde, faaliyetlerin süresine ilişkin bilgi genellikle belirsizlik içermektedir. Faaliyet süreleri üzerinde kısmi bilinen, eksik süreler veya öznel uzman görüşlerine dayanana bu durum, bilgi ve veri yetersizliğini ifade eden "Gri Belirsizlik" ortamını yaratır.

Geleneksel çizelgeleme teknikleri, bu gri belirsizliği yönetmekte yetersiz kalmaktadır. Kritik yol yöntemi (Critical Path Method – CPM), faaliyet sürelerinin kabul edildiği deterministik bir kesinliğe dayanır. Program değerlendirme ve izleme tekniği (Program Evaluation and Review Technique – PERT) ise, faaliyet sürelerinin Beta dağılımına uyduğunu varsaymaktadır. Ar-Ge ve yenilikçi mühendislik çalışmaları), doğası gereği yüksek derecede bilgi eksikliği ve öngörülemezlik içermektedir (Beşikçi vd., 2015). Bu varsayım, geçmiş verilerin yetersiz olduğu yenilikçi projeler için faaliyet süreleri açısından eksik kalmaktadır (Aydın ve Atlı, 2021). Projelerin tamamlanma süresi için başarısızlık riskini en aza indirmek ve güvenilir bir planlama aralığı sunmak son derece önemlidir. Bu nedenle faaliyet süreleri üzerindeki belirsizlikleri inceleyen yeni yaklaşımlar gerekmektedir.

Prof. Julong Deng (1982) tarafından kuramsallaştırılan Gri Sistem Teorisi (GST), 1989 yılı ve sonrası mühendislik ve yönetim bilimlerinde uygulama çalışmalarının artması ile hızla kabul görmüştür. GST, sistemleri bilgi içeriğine göre üç kategoriye ayırır (Liu ve Lin, 2010; Liu, 2025):

- *Beyaz Sistemler: Bilginin ve parametrelerin tamamen bilindiği sistemler*
- *Siyah Sistemler: Bilginin tamamen bilinmediği sistemler*
- *Gri Sistemler: Bilginin kısmen bilindiği, kısmen bilinmediği veya eksik olduğu sistemler.*

Gri Sistem Teorisi ile işlem yaparken kullanılan Gri Sayılar, belirsizliği temelde sınırlı (limitli) bir aralık olarak tanımlamaktadır (Liu ve Lin, 2010; Aydemir vd., 2015; Aydemir, 2020; Liu, 2025). Bu tanımlama, bulanık mantık yaklaşımının üyelik fonksiyonlarını tanımlama zorluğunu ortadan kaldırarak, proje yöneticilerinin sadece faaliyetlerin minimum ve maksimum olası sürelerini tahmin etmesini yeterli kılmaktadır. Bu yaklaşım, teoremin özellikle az veri içeren veya yüksek oranda tahmin gerektiren proje çizelgeleme (Mahdiraji vd., 2016) ve risk yönetimi uygulamalarında (Xie, 2018) yaygınlaşmasını sağlamıştır.

Bu çalışmada, aynı gri sayılar ile tanımlanmış proje planları kullanılarak modellenen bir proje ağında, kritik yolu ve tamamlanma süresini belirleme amacına yönelik iki farklı algoritmanın kullanımı araştırılmıştır. Birinci algoritma olarak Xie (2018) tarafından geliştirilen projenin tamamlanacağı en uzun yolun bulunması prensibine dayalı Gri CPM yaklaşımıdır. Bu yöntem riskten kaçınmaya odaklanan bir yaklaşım olarak ele alınmaktadır. İkinci algoritma ise; optimizasyon ya da üstünlük odaklı bir yaklaşım ile Mi vd. (2006) tarafından önerilen Gri Dijkstra algoritması ile çözüm araştırılmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde gri sistem teorisi ve bulanık mantık ile proje çizelgeleme problemi üzerinde bir bilimsel yazın araştırması özetlenmiştir. Üçüncü bölümde ise; her iki yöntem için tanımlar ve uygulama aşaması için gerekli yaklaşımlara ait açıklamalara yer verilmiştir. Dördüncü bölümde ise; örnek proje planı üzerinden incelenen iki yöntemin etkileri araştırılmıştır. Son bölümde ise; araştırmadan elde edilen çıkarımlardan bahsedilmiş ve gelecek araştırmasının neler olabileceği tartışılmıştır.

İLİŞKİLİ BİLİMSEL YAZIN ARAŞTIRMASI

Proje çizelgeleme problemlerinde de birçok problem sınıfında olduğu gibi belirsizlik durumları ortaya çıkmaktadır. Proje planı üzerinde öncelikli belirsizlik durumu faaliyet süreleri olarak görülmekte ve projenin tamamlanma süresinin belirlenmesinde bir belirsizlik durumuna neden olmaktadır.

Bu noktada faaliyet süreleri üzerinde genellikle olasılıklı belirsizlik açısından bakıldığında; Beta dağılımı ile PERT analizi ile karşılaşılmaktadır. Bu yaklaşımda projenin tamamlanma süresi, beklenen tamamlanma süresine dönüşür ve kritik yol üzerinde yer alan n tane Beta dağılım gösteren faaliyetten elde edildiği için normal dağılım özelliği göstermektedir. Bu durum merkezi limit teoremi ile konu açıklanabilir.

Diğer belirsizlik türlerinin başında ise; belirsizliğin dilsel veya uzmanlığa dayalı olduğu durumlar için tanımlanan bulanık mantık gelmektedir. Geleneksel PERT'in üç nokta tahminine (iyimser, en olası, kötümser) duyulan güven, Zadeh (1965) tarafından duyurulan bulanık kümelerin probleme uyarlanması ile artırılmıştır. Habibi vd. (2018) yaptıkları çalışmada bulanık mantık yaklaşımını kullanarak proje süresi ve maliyetleri üzerindeki tahminlere ait belirsizliğin sadece sayısal değil, aynı zamanda dilsel boyutunu da modellemiştir. Öte yandan Chaoa (2018) tarafından proje izleme sürecinde bulanık mantık yaklaşımının belirsizlik altında etkinliğini gösterilmiştir. Benzer şekilde; Maia ve Khuman (2021) ise maliyet tahmininde yüksek doğruluk oranı yakalayarak, uzman bilgi kullanımının sistematığe dönüştürülmesindeki gücünü kanıtlamıştır. Günümüzde proje yönetimi altında ele alınan önemli konulardan birisi de; proje risk

yönetimidir. Rola ve Kuchta (2019) yaptıkları çalışmada çevik proje yönetiminde uzmanların yaptığı tahminlerin belirsizliğinde bulanık belirsizlik kullanmıştır. Benzer şekilde Krawczyńska ve Kuchta (2021) ise; riskin nitel boyutlarını üyelik fonksiyonlarıyla birleştirerek, risk önceliklendirmesinde daha esnek ve gerçekçi bir yaklaşım sunmuşlardır. Dursun vd. (2019) ise; çevik performansın öznel değerlendirmesine nesnellik katmışlardır. Ayrıca, proje yönetimindeki uygulamalar, operasyonel süreçlerden stratejik karar verme seviyesine kadar uzanmaktadır. Stratejik seviyede ise; Polova vd. (2021) tarafından sürdürülebilirlik odaklı projelerin ekonomik, sosyal ve çevresel kriterler bazında bulanık çok kriterli karar verme yaklaşımları ile değerlendirilmesi yapılmıştır.

Bu çalışmada ise, belirsizlik yaklaşımı olarak gri sistem teorisi; bulanık mantığa göre daha az parametre gerektirmesi nedeniyle, özellikle sınırlı veriye sahip proje çizelgeleme ortamlarında tercih edilen önemli bir araç olmuştur. Mi vd. (2006) yaptıkları çalışmada; rota optimizasyonu probleminden yola çıkarak, gri sayılar için bir üstünlük ilişkisi kurallar seti önermiştir. Daha sonra bu kuralların rasyonel karar vermeyi temsil ettiğini ve bu kurallara dayalı Gri Dijkstra (G-D) algoritmasının, belirsizlik altındaki en kısa/en üstün (minimum) yolu bulmada etkili olduğunu iddia etmişlerdir. Bu yaklaşım, optimizasyon ve belirsizliğin azaltılması felsefesini temsil eder. Mahdiraji vd. (2016) yaptıkları çalışmada ise; gri hedef programlama ile kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemleri için CPM analizi yapmışlardır. Xie (2018) ise; gri sayılar matematiğini kullanarak bir faaliyet için Erken Başlangıç (ES), Erken Bitiş (EF), Geç Başlangıç (LS) ve Geç Bitiş (LF) sürelerini faaliyet sürelerinin gri sayılar ile belirleneceğini söylemiştir. Ayrıca, Xie (2018) max (en büyük) operatörünün gri sayı kıyaslamasında en uzun süreli yolu seçecek şekilde tasarlanması gerektiğini savunur, bu da klasik CPM'in riskten kaçınma felsefesinin gri ortama taşınması olarak kabul edilebilir.

Bu çalışmada; örnek bir proje planı için gri sistem teorisi açısından geliştirilen iki modelin uygulaması ve nihai tamamlanma süreleri üzerinde üretilen alternatif çözümler ele alınmıştır.

YÖNTEM

1. Gri Sayılar ve Proje Çizelgelemede Kullanımı

Çalışmada faaliyet süresinin $\otimes s(i,j)$ ile temsil edildiği bir gri sayı, belirsizliğin alt ve üst sınırlarını belirleyen kapalı bir aralık olarak ele alınmıştır.

$$\otimes s(i,j) = [s_i, j_L, s_i, j_R], s_i, j_L \leq s_i, j_R, s_i, j_L, s_i, j_R \in R$$

Bu gri sayılar üzerinde uygulanan temel işlemler, aralık cebiri kurallarına tabidir. Bu temel aritmetik kuralları, hem Gri CPM hem de Gri Dijkstra modellerinde ortak olarak kullanılır. $\otimes A = [a1, a2]$ ve $\otimes B = [b1, b2]$ farklı faaliyet sürelerini temsil eden iki gri sayı olmak üzere:

- *Toplama İşlemi (Sürelerin Ardışık Toplanması):*

$$\otimes A \oplus \otimes B = [a1 + b1, a2 + b2]$$

- *Çıkarma İşlemi (Serbest Zaman Hesaplaması):*

$$\otimes A \ominus \otimes B = [a1 - b2, a2 - b1]$$

2. Gri Dijkstra Modeli İlişkisi (Mi vd., 2006)

Gri Dijkstra (G-D) algoritmasının temelini, iki Gri Sayı arasındaki sıralamayı belirleyen Mi vd. (2006) tarafından önerilen rasyonel karar kuralları oluşturmaktadır. Bu kurallar, sayısal değerin yanı sıra, belirsizliğin derecesini de dikkate almaktadır.

- *Çekirdek Değer (Central Value-C):* Gri Sayının ortalama tahminini temsil etmektedir.

$$C(\otimes A) = (a1 + a2)/2$$

- *Aralık Genişliği (Uncertainty Degree-W):* Gri Sayının belirsizlik derecesini temsil eder.

$$W(\otimes A) = a2 - a1$$

- *Üstünlük İlişkisi Hiyerarşisi:*

$\otimes A$ ve $\otimes B$ kıyaslanırken, öncelik sırası:

1. *Öncelik: Çekirdek Değer:* Eğer $C(\otimes A) > C(\otimes B)$ ise, $\otimes A$ gri sayısı daha üstündür/büyüktür denir.

2. *Öncelik: Aralık Genişliği:* Eğer $C(\otimes A) = C(\otimes B)$ ise, belirsizliği daha küçük olan sayı rasyonel olarak daha üstün kabul edilir; yani $W(\otimes A) < W(\otimes B)$ ise, $\otimes A$ gri sayısı daha üstündür/büyüktür denir. Bu durum proje planı üzerinde, aynı ortalamaya sahip yollardan, daha dar zaman aralığına sahip olanın tercih edilmesi gerektiği anlamına gelmektedir.

Gri Dijkstra yaklaşımı sonuç olarak, her iterasyonda bu kurallara göre en küçük/en üstün (minimum) gri mesafeyi seçerek ilerleyen yapısı ile proje çizelgesini gerçekleştirir (Mi vd., 2006).

3. Aralık Gri CPM Yaklaşımı (Xie, 2018)

Klasik CPM yönteminin riskten kaçınma ve en uzun yolu bulma yaklaşımına uygun olacak şekilde Xie (2018) tarafından önerilen Gri CPM yaklaşımı, faaliyetin bolluk zamanının $\otimes S(i,j)$ 'nin $[0,0]$ olması, o faaliyetin kritik yolda olduğunu gösterir.

- *İleri Doğru Çizelgeleme (En Erken Zamanların Hesaplanması):*

$$\otimes ES_j = i \in Pjmax\{\otimes EF(i,j)\}$$

Burada en büyük (max) operatörü, bir düğüme gelen yollar arasından projenin bitişini en çok geciktirecek gri faaliyet süresini seçmeyi ifade eder. Xie (2018) yönteminde bu kıyaslama kuralı, genel olarak en büyük C ve ardından en büyük W değerini seçecek şekilde yorumlanmakta, böylece en uzun süreyi maksimize eden Gri Sayı seçilmektedir.

- *Geriye Doğru Çizelgeleme (En Geç Zamanların Hesaplanması):*

$$\otimes LFi = j \in Simin\{\otimes LS(i,j)\}$$

Burada ise en küçük (min) operatörü, projenin bitişini aksatmayacak en erken zamanı bulmak için en küçük gri faaliyet süresini seçmeyi ifade etmektedir. Xie (2018) tarafından önerilen Gri CPM yöntemi, ileri doğru çizelgelemede riskten kaçınma (en uzun süreli yol), geriye doğru çizelgelemede ise kısıtlı kalma (en erken sonlandırma) prensiplerini uygulayarak kritik yolu belirlemektedir.

UYGULAMA

Gri proje analizi uygulama örneği olarak, dokuz (9) düğüm (node) ve 11 faaliyetten oluşan, yönlendirilmiş döngü içermeyen bir proje ağı ele alınmıştır. Faaliyet süreleri, Xie (2017) çalışmasında kullanılan sayısal örneğe dayanarak (Tablo 1), uzman görüşüne dayalı gri sayılar olarak tanımlanmıştır.

Faaliyet	Öncüller	Süre $\otimes s$ [min, max]	Faaliyet	Öncüller	Süre $\otimes s$ [min, max]
1,2	-	[5,8]	4,7	2,4	[5,6]
2,3	1,2	[6,9]	5,7	2,5	[6,9]
2,4	1,2	[5,10]	6,8	2,3	[7,8]
2,5	1,2	[4,6]	7,8	(4,7), (5,7)	[9,11]
3,6	2,3	[5,9]	8,9	(6,8), (7,8)	[5,7]

Tablo 1: Gri Faaliyet Süreli (Xie, 2017)

Uygulama aşamasında öncelikle Gri Dijkstra algoritması incelenmiştir. Başlangıç düğümü (1) ile bitiş düğümü (9) arasındaki en üstün yolu bulmak için Üstünlük İlişkisi kurallarını kullanır. Dört ana yolun kıyaslaması ve gri sayı özellikleri (Çekirdek Değer, Aralık Genişliği) Tablo 2’de verilmiştir.

Yol	Faaliyet Zinciri	Toplam Gri Süre [min, max]	Çekirdek Değer (C)	Aralık Genişliği (W)	Kıyaslama (Mi vd., 2006)	Sonucu
A	1→2→3→ 6→8→9	[28,41]	34.5	13	2. (Yol B'den daha geniş W)	En Üstün
B	1→2→5→ 6→8→9	[29,40]	34.5	11	1. (C eşit, W en küçük)	En Üstün
C	1→2→5→ 7→8→9	[29,41]	35.0	12	3.	Üstün
D	1→2→4→ 7→8→9	[29,42]	35.5	13	4. En Az (C en büyük)	Üstün

Tablo 2: Gri Dijkstra Çözümü

Teorik olarak, Yol B, C değeri en küçük olanlardan ve W değeri en kısa olan olduğu için en üstün yol olarak belirlenmelidir. Ancak, örnek uygulama verilerinin adım adım Dijkstra algoritması ile incelenmesi sonucunda, en üstün (minimum) gri mesafeler kritik yolu aşağıdaki gibidir:

Gri Dijkstra sonucu özetle:

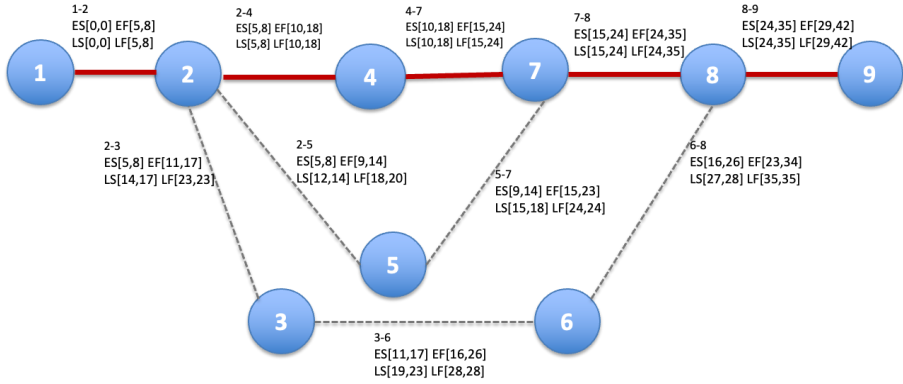
Kritik Yol (En Üstün Yol): 1→2→5→6→8→9

Toplam Proje Süresi: [29,40]

Xie (2018) modelinde ise; Gri CPM modeli max ve min operatörlerini kullanarak, bolluk zamanı $\otimes S = [0,0]$ olan faaliyetler ağını belirler. İleriye doğru çizelgelemede en büyük gri süre (en uzun süreli yol) ve geriye doğru çizelgelemede ise en küçük gri süre (en erken olası bitiş) dikkate alınmaktadır. Tüm proje ağı için hesaplama sonuçları Tablo 3’te ve proje ağ diyagramı ise Şekil 1’de verilmiştir.

Faaliyet	Süre ⊗s	⊗ES (Erken Başl.)	⊗EF (Erken Bitiş)	⊗LS (Geç Başl.)	⊗LF (Geç Bitiş)	⊗S (Bolluk Zam.)	Kritik Yol Mu?
1,2	[5,8]	[0,0]	[5,8]	[0,0]	[5,8]	[0,0]	EVET
2,3	[6,9]	[5,8]	[11,17]	[14,17]	[23,23]	[6,12]	HAYIR
2,4	[5,10]	[5,8]	[10,18]	[5,8]	[10,18]	[0,0]	EVET
2,5	[4,6]	[5,8]	[9,14]	[12,14]	[18,20]	[4,9]	HAYIR
3,6	[5,9]	[11,17]	[16,26]	[19,23]	[28,28]	[2,12]	HAYIR
4,7	[5,6]	[10,18]	[15,24]	[10,18]	[15,24]	[0,0]	EVET
5,7	[6,9]	[9,14]	[15,23]	[15,18]	[24,24]	[1,9]	HAYIR
6,8	[7,8]	[16,26]	[23,34]	[27,28]	[35,35]	[1,12]	HAYIR
7,8	[9,11]	[15,24]	[24,35]	[15,24]	[24,35]	[0,0]	EVET
8,9	[5,7]	[24,35]	[29,42]	[24,35]	[29,42]	[0,0]	EVET

Tablo 3: Gri CPM çözümü (Xie, 2018)



Şekil 1: Gri CPM modeli ağ diyagramı (AoA)

Aralık Gri CPM sonucu özetle:

Kritik Yol (En Uzun Yol): 1→2→4→7→8→9

Toplam Proje Süresi: [29,42]

SONUÇ

Elde edilen bulgular, Gri Sistem Teorisi'nin proje çizelgelemedeki alternatif çözüm üretmedeki güçlü potansiyelini göstermesi, aynı zamanda modelleme açısından faaliyet süresi üzerindeki belirsizliklerin aralıklı tasarımı ile projenin

yönetimsel kararları üzerindeki ayırıştırıcı etkisini de önemli bir avantaj olarak sunmaktadır. Bu çalışmada uygulama örneği için bilimsel yazında yer alan Gri Dijkstra (Mi vd., 2006) ve Aralık Gri CPM (Xie, 2018) modelleri Tablo 4 ile karşılaştırılmıştır.

Sayısal sonuçlara göre Aralık Gri CPM'in bulduğu [29,42] aralığı, projenin tamamlanma süresi için daha geniş ve daha kötümser bir üst sınır (42) değer sunmaktadır. Bu, proje yöneticisine, projenin kesinlikle bu aralık içinde tamamlanacağını varsaymasını ve kaynakları buna göre planlamasını (riskten kaçınma) önermektedir. Diğer yaklaşımda ise, Gri Dijkstra'nın bulduğu [29,40] aralığı, C değeri 34.5 olan ve aralık genişliği (belirsizliği) 11 olan bir proje planı yoludur. Bu, modelin en iyi performansa sahip yolu bulma amacını yansıtmaktadır. Yönetimsel olarak, Gri CPM risk odaklı planlamaya, Gri Dijkstra ise performans odaklı optimizasyona hizmet etmektedir. Bu metodolojik ayrışma, yöneticilerin tek bir Gri Sayı modeline güvenmek yerine, risk alma seviyesi ve projenin türüne göre doğru algoritmayı seçmeleri gerektiğini kesinleştirir. Sonuçta her iki yaklaşımda gri belirsiz faaliyet sürelerine göre farklı alternatif çözüm sunması sebebiyle gri system teorisinin etkinliğinden bahsedilebilir.

Özellik	Gri Dijkstra Yöntemi	Aralık Gri CPM Modeli
Temel Referans	Mi vd., (2006)	Xie (2017)
Hedeflenen Yol	En Üstün (Minimum En Uzun (Maksimum Belirsizlik/Optimal) Yol	Süre/Riskten Kaçınma) Yol
Kritik Yol	1→2→5→6→8→9 [28,41]	1→2→4→7→8→9 [29,42]
Proje Süresi	(Daha erken tamamlanma, daha kısa aralık)	(Daha geç tamamlanma, daha geniş aralık)
Karar Kriteri	Üstünlük Derecesi (C ve W) ⇒ Optimizasyon	Maksimum Aralığın Seçimi ⇒ Riskten Kaçınma

Tablo 4: Yöntemlerin karşılaştırılmalı özellikleri ve model sonuçları

Bulanık Mantık, uzmanlık ve olasılıksal yaklaşımı yumuşatırken; Gri Sistem Teorisi ise; bilgi eksikliğini kapalı aralıklarla sınırlandırmaktadır. Bu çalışmanın sonuçları, Gri Sistem Teorisi'nin projenin operasyonel çizelgeleme boyutunda dahi alternatif çözümler üretebileceğini göstermektedir. Buna göre; proje yöneticisi, Mi vd. (2006)'nın yaklaşımını, en az belirsizlik içeren (en kısa aralık) yolların belirlenmesi için bir önceliklendirme aracı olarak kullanabilir. Ardından, bu yollar üzerinde Xie (2018)'nin Gri CPM modelini uygulayarak, seçilen yolun en kötü durum senaryosunu (maksimum süresini) hesaplayabilecektir.

Gelecek araştırmalar, farklı gri belirsizlik beyazlaştırma yaklaşımları ile desteklenebileceği gibi bu iki güçlü yöntemi birleştiren şekilde melez karar verme

sistemlerine odaklanabilecektir. Örneğin, Gri CPM ile belirlenen kritik yolun faaliyetlerine ait Aralık Genişliği (W) değerleri, Bulanık Monte Carlo benzetimi yaklaşımlarına girdi olarak verilerek, bu faaliyetlerin projenin genel riskine ile katkısı incelenebilir. Bu sayede, yöneticiler hem gri belirsizliğin sınırlarını bilir hem de bulanık mantıkla bu sınırların içerisindeki risk dağılımını daha esnek bir şekilde değerlendirebilirler. Bu bütünlük yaklaşımın, özellikle sürdürülebilir kalkınma ve karmaşık Ar-Ge projeleri gibi yüksek belirsizlik içeren alanlarda karar verme kalitesini önemli ölçüde artıracakı öngörülmektedir.

REFERANSLAR

- Aydın, S. ve Atlı, Ö. (2021). Çok modlu kaynak kısıtlı proje çizelgeleme problemlerinin belirsizlik ortamında modellenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 21(3), 524-536.
- Aydemir E., Bedir F., Özdemir G., 2015. Degree of Greyness Approach for an EPQ Model with Imperfect Items in a Copper Wire Industry, Journal of Grey System, 27 (2), 13-26.
- Aydemir E. 2020. A New Approach for Interval Grey Numbers: N-th Order Degree of Greyness, Journal of Grey System, 32(2), pp. 89-103.
- Beşikçi, U., Bilge, Ü. ve Ulusoy, G. (2015). Multi-mode resource constrained multi-project scheduling and resource portfolio problem. European Journal of Operational Research, 240(1), 22-31.
- Chaoa, L. C. (2018). Fuzzy Logic Model for Initial Project Screening with Consideration of Decision Position. Fuzzy logic model for initial project screening with consideration of decision position. (2018). Creative Construction Conference 2018: Procedia, 66.
- Deng, J. (1982). Control Problems of Grey Systems. Systems & Control Letters, 1(5), 288-294.
- Dursun, M., Goker, N., & Mutlu, H. (2019, July). A fuzzy decision aid for evaluating agile project management performance indicators. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2116, No. 1, p. 450031). AIP Publishing LLC.
- Habibi, F., Birgani, O., Koppelaar, H., & Radenović, S. (2018). Using fuzzy logic to improve the project time and cost estimation based on Project Evaluation and Review Technique (PERT). Journal of Project Management, 3(4), 183-196.
- Krawczyńska, A., & Kuchta, D. (2021, August). Fuzzy Risk Management System for Small Cultural Institutions. In International Conference on Intelligent and Fuzzy Systems (pp. 647-654). Cham: Springer International Publishing.
- Lui, S. ve Lin, Y. (2010). Grey Systems: Theory and Applications. Springer-Verlag.
- Lui, S. (2025) Grey Systems Analysis: : Methods, Models and Applications. Springer Nature Singapore
- Mahdiraji, H. A., Ghassemi, M. ve Mahdizadeh, S. H. (2016). A grey goal programming model for critical path analysis in project management. Journal of Applied Sciences, 16(2), 52-60.
- Maia, D. H. ve Khuman, A. S. (2021). A Mamdani Fuzzy Logic Inference System to Estimate Project Cost. Editör S. S. Choudhari, Fuzzy Logic (pp. 145-163). Springer International Publishing.
- Mi, C., Liu, S., Fang, Z., Wu, X., ve Zhang, H. (2006). The driver's shortest path decision-making model and its algorithm study based on grey number

superiority relationship. Proceedings of the Fifth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Dalian, 13-16 August 2006.

Polova, A., Maksyshko, N., & Vasylieva, O. (2021). Modeling the assessment of investment projects for territorial communities in compliance with the concept of sustainable development. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 280, p. 04008). EDP Sciences.

Rola, P., & Kuchta, D. (2019). Application of fuzzy sets to the expert estimation of Scrum-based projects. *Symmetry*, 11(8), 1032. Application of Fuzzy Sets to the Expert Estimation of Scrum-Based Projects. (2019). *Symmetry*, 11(8), 1032.

Xie, N. (2018). Interval grey number based project scheduling model and algorithm. *Grey Systems: Theory and Application*, 8(2), 173-191. doi:10.1108/GS-11-2017-0035.

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353.

BÖLÜM 45

Nükleer Enerji Santrallerinde Kritik Malzemeler

Güven Yarkadaş¹

¹ Mersin Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Mersin,
ORCID:0000-0002-4592-2768

1. Giriş ve Nükleer Enerji Tesislerinin Kısa Tarihçesi

Nükleer enerjinin serüveni, öncelikle atom bombası geliştirilmesi amacıyla II. Dünya Savaşı sırasında başlamıştır (Mahaffey, 2011). Enrico Fermi'nin 2 Aralık 1942'de Chicago Üniversitesi'nde ilk kontrollü nükleer reaktör olan CP-1'i (Chicago Pile 1) çalıştırması, maddenin enerjiye kontrollü dönüşümünün mümkün olduğunu kanıtlayan çığır açıcı bir olaydır (Gupta, 1989; Mahaffey, 2011; Tsvetkov, 2021). Bu ilk reaktör, grafit blokları ve uranyum silindirlerinden oluşan dev bir yığın olarak inşa edilmiştir (Gupta, 1989).

Savaştan sonra nükleer teknoloji sivil kullanıma yönelmiş ve 1950'lerin ortalarından itibaren ilk prototip nükleer santraller faaliyete geçmiştir (Hoffelner, 2013; Mahaffey, 2011). İlk ticari nükleer santraller arasında 1957'de ABD'de Shippingport Atom Enerjisi Santrali (Rickover'ın basınçlı su reaktörü tasarımı baz alınmıştır) ve İngiltere'de Calder Hall (grafit moderatörlü, gaz soğutmalı Magnox reaktörü) bulunmaktadır (Gupta, 1989; Mahaffey, 2011). Nükleer güç reaktörleri, termal (yavaş) nötronları kullanarak zincir reaksiyonunu sürdüren veya hızlı (yüksek enerjili) nötronları kullanan sistemler olarak geliştirilmiştir (Tsvetkov, 2021; Toshinsky & Petrochenko, 2012). 1979 TMI (Three Mile Island) ve 1986 Çernobil kazalarından sonra güvenlik gereklilikleri önemli ölçüde artırılmıştır (Hoffelner, 2013). 2000'li yılların başından itibaren, sürdürülebilirlik ve güvenlik hedefleri doğrultusunda Dördüncü Nesil (Gen IV) reaktörlerin geliştirilmesi için uluslararası çalışmalar hız kazanmıştır (Yvon, 2017).

2. Nükleer Enerji Santrallerinin Çeşitleri

Nükleer reaktörler; nötron spektrumu, soğutma ortamı ve moderatöre göre sınıflandırılır (Hoffelner, 2013; Tsvetkov, 2021).

Reaktör Tipi	Nötron Spektrumu	Soğutucu	Moderatör	Önemli Özellikler
LWR (Hafif Su)	Termal	Hafif Su ()	Hafif Su ()	Dünya genelinde en yaygın (~%80). PWR ve BWR olarak ayrılır (Hoffelner, 2013).
PHWR/CANDU	Termal	Ağır Su ()	Ağır Su ()	Doğal uranyum yakıtı kullanır, basınç tüplü tasarıma sahiptir (IAEA, 2007b).
AGR (Gelişmiş Gaz)	Termal		Grafit	İngiltere'ye özgü, daha yüksek sıcaklıkta çalışır (Hoffelner, 2013).
Gen IV - SFR	Hızlı	Sıvı Sodyum (Na)	Yok	Yüksek yanma verimi, aktinid yönetimi sağlar (Yvon, 2017).
Gen IV - VHTR	Termal	Helyum (He)	Grafit	850–1000°C çıkış sıcaklığı, hidrojen üretimi için idealdir (Yvon, 2017).
Gen IV - LFR	Hızlı	Sıvı Kurşun (Pb)	Yok	480–800°C sıcaklık, yüksek güvenlik seviyesi (Toshinsky & Petrochenko, 2012).
Gen IV - MSR	Termal/Hızlı	Erimiş Florür	Grafit	Yakıt sıvı tuzda çözünmüş haldedir (Yvon, 2017).
Gen IV - SCWR	Termal/Hızlı	Süperkritik Su	Su/Yok	510–625°C, 25 MPa, yüksek termal verimlilik (~%44) (Hoffelner, 2013).

3. Nükleer Ortamda Malzemeleri Zorlayan Şartlar

Nükleer reaktör bileşenleri, 40 ila 60 yıla kadar çıkan işletme ömürleri boyunca LWR'lerde 350°C, Gen IV sistemlerinde ise 500°C ile 1000°C arasında değişen sıcaklıklarda çalışır (Hoffelner, 2013; Yvon, 2017).

- **Radyasyon Hasarı:** Reaktör çekirdeği bileşenleri atomların yer değiştirmesine (deplasman hasarı, dpa) maruz kalır (Aitkaliyeva ve ark., 2017). Hızlı reaktörlerde yakıt kaplaması malzemelerinin 200 dpa'ya kadar hasar görmesi beklenir (Yvon, 2017). Bu durum gevrekleşme, void şişmesi ve radyasyon sürünmesine yol açar (Aitkaliyeva ve ark., 2017).

- **Korozyon:** Sıvı metaller (Na, Pb) yapısal malzemeleri çözündürebilirken, erimiş tuzlar oksit tabakası oluşumunu engeller (Fazio & Balbaud, 2017). Süperkritik su sistemlerinde ise radyasyon destekli gerilim korozyon çatlaması (IASCC) riski mevcuttur (Hoffelner, 2013).

4. Nükleer Enerji Santrallerinde Kullanılan Kritik Malzemeler

Malzeme seçimi; düşük nötron soğurma, yüksek ısı iletkenliği ve sürünme direnci arasında bir denge gerektirir (Allen ve ark., 2010).

4.1. Yakıt ve Yakıt Kaplaması Malzemeleri

- **Uranyum Dioksit (O):** LWR'lerin temel yakıtıdır (2760°C erime noktası) (Gupta, 1989).
- **TRISO Partikülleri:** VHTR reaktörlerinde kullanılan, SiC ve Pirolitik Karbon kaplamalı mikrokürelerdir (Allen ve ark., 2010).
- **Zirkonyum Alaşımları:** Düşük termal nötron soğurma kesiti nedeniyle LWR/PHWR'lerde tercih edilir (Gupta, 1989; IAEA, 2007b).
- **SiC/SiC Kompozitleri:** Yüksek sıcaklık ve nötron direnci sayesinde Gen IV çekirdek bileşenleri için en güçlü adaydır (Park, 2017).

4.2. Yapısal Malzemeler ve Isı Değiştiriciler

- **RPV Çelikleri:** LWR'lerde düşük alaşımlı çelikler (A533B, A508) kullanılır (Hoffelner, 2013).
- **Nikel Bazlı Süperalaşımlar:** Hastelloy N, erimiş tuzlara karşı dirençlidir; Alloy 617 ise 950°C'ye kadar yüksek sürünme dayanımı sağlar (Hoffelner, 2013; Yvon, 2017).
- **ODS Çelikleri:** Nano-ölçekli oksitlerle güçlendirilmiş, radyasyona karşı üstün şişme direnci gösteren malzemelerdir (Nikitina ve ark., 2008).

5. Kritik Malzemelerin Üretim ve İmalat Yöntemleri

5.1. Ergitme, Saflaştırma ve Şekillendirme

Stratejik alaşımlarda kimyasal saflığı korumak için Vakum İndüksiyon Eritme (VIM), Vakum Ark Eritme (VAR) ve Elektro Cüruf Eritme (ESR) kullanılır (Hoffelner, 2013; Lavrinenko ve ark., 2014). Reaktör gövdesi gibi devasa bileşenler, kaynak hatlarını azaltmak için dövme halkaların kaynaklanmasıyla imal edilir (Hoffelner, 2013). Zirkonyum tüpler ise sıcak dövme ve ekstrüzyon sonrası çok aşamalı soğuk pilgerleme ile üretilir (IAEA, 2007b).

5.2. ODS (Oksit dispersiyonla güçlendirilmiş) Çeliklerinin Üretim Aşamaları

ODS çelikleri, oksitlerin toplanmasını önlemek için toz metalurjisi ile üretilir (Nikitina ve ark., 2008):

1. Mekanik Alaşımlama (MA): Metal tozları ve yitrium oksit (Y₂O₃) bilyalı değirmende öğütülerek matris içinde çözündürülür (Nikitina ve ark., 2008).

2. Kapsülleme ve Gaz Giderme: Tozlar metal kapsüllere doldurulur ve vakum altında mühürlenir (Vladimirov ve ark., 2008).

3. Sıcak Konsolidasyon: 1000-1200°C'de Sıcak Ekstrüzyon veya HIP (Sıcak izostatik pres) ile yoğunlaştırılır; bu sırada 2-5 nm boyutunda nano-oksitler çökeler (Nikitina ve ark., 2008).

4. Final İşlemler: Soğuk şekillendirme, ara tavlama ve normalizasyon/temperleme ısı işlemleri uygulanır (Asayama, 2017).

5.3. Nükleer Grafit ve SiC/SiC Üretimi

Nükleer grafit üretiminde petrol koku dolgu malzemesi, kömür katranı zifti ise bağlayıcı olarak kullanılır (Marsden ve ark., 2017). Karışım pişirildikten sonra yoğunluğu artırmak için emprenye edilir ve 2800-3000°C'de grafitizasyon işlemine tabi tutulur (Hoffelner, 2013). SiC/SiC kompozitleri ise genellikle Kimyasal Buhar Sızma (CVI) yöntemiyle fiber önformların içine kristal matris sızdırılmasıyla üretilir (Park, 2017).

5.4. Büyük Parça İmalatındaki Zorluklar

Reaktör gövdesi gibi devasa parçaların üretiminde en büyük zorluk kimyasal saflığı sağlamaktır (Hoffelner, 2013). Fosfor ve kükürt gibi safsızlık elementlerinin düşük tutulması radyasyon gevrekleşmesini önler. Ayrıca, büyük ingot dökümü sırasında oluşan makro-segregasyon ve katılaşma kusurları yapısal bütünlüğü tehdit eder (Hoffelner, 2013). Bu parçaların dövülmesinde 15.000 tonluk ağır dövme presleri kullanılır (Hoffelner, 2013).

6. Nükleer Yakıt Döngüsü ve İleri Reaktör Stratejileri

Gen IV tasarımları, aktinitlerin geri dönüştürüldüğü kapalı yakıt döngüsünü benimser (IAEA, 2005). Hızlı reaktörler Pu ve minör aktinitleri (MA) yakarak transmutasyon sağlar (Yvon, 2017). Fukushima sonrası, zirkonyum yerine FeCrAl veya SiC kullanılan kazaya toleranslı yakıtlar (ATF) ve proliferasyon direnci yüksek toryum döngüleri öncelik kazanmıştır (Allen ve ark., 2010; IAEA, 2002).

7. İleri Malzeme Karakterizasyon ve Modelleme Yöntemleri

Malzemelerin 60 yıllık ömrünü tahmin etmek için çok ölçekli modelleme kullanılır (Hoffelner ve ark., 2008). Radyasyon hasarının nano yapısını incelemek için Küçük Açılı Nötron Saçılması (SANS) ve Pozitron İmha Spektroskopisi (PAS) gibi ileri teknikler esastır (Amarendra ve ark., 2007).

Kaynakça

- Aitkaliyeva, A., He, L., Wen, H., Miller, B., Bai, X. M., & Allen, T. (2017). Irradiation effects in Generation IV nuclear reactor materials. In P. Yvon (Ed.), *Structural materials for Generation IV nuclear reactors* (pp. 253-284). Woodhead Publishing.
- Allen, T. R., Busby, J., Meyer, M., & Petti, D. (2010). Materials challenges for nuclear systems. *Materials Today*, 13(12), 14-23.
- Amarendra, G., Rajaraman, R., Sundar, C. S., & Raj, B. (2007). Materials characterization using positron annihilation spectroscopy. In *Characterization and testing of materials for nuclear reactors* (IAEA-TECDOC-1545, pp. 25-36). Vienna, Austria: IAEA.
- Asayama, T. (2017). Conventional ferritic and martensitic steels as out-of-core materials for Generation IV nuclear reactors. In P. Yvon (Ed.), *Structural materials for Generation IV nuclear reactors* (pp. 635-648). Woodhead Publishing.
- Fazio, C., & Balbaud, F. (2017). Corrosion phenomena induced by liquid metals in Generation IV reactors. In P. Yvon (Ed.), *Structural materials for Generation IV nuclear reactors* (pp. 22-74). Woodhead Publishing.
- Gupta, C. K. (1989). *Materials in nuclear energy applications* (Vol. 1). Boca Raton, FL: CRC Press. (Reissued 2017).
- Hoffelner, W. (2013). *Materials for nuclear plants: From safe design to residual life assessments*. London, England: Springer-Verlag.
- Hoffelner, W., Samaras, M., Bako, B., & Iglesias, R. (2008). Materials modelling – A possible design tool for advanced nuclear applications. In *Structural materials for innovative nuclear systems (SMINS)* (pp. 327-334). Paris, France: OECD.
- International Atomic Energy Agency. (2002). *Thorium fuel utilization: Options and trends* (IAEA-TECDOC-1319). Vienna, Austria: IAEA.
- International Atomic Energy Agency. (2005). *Thorium fuel cycle — Potential benefits and challenges* (IAEA-TECDOC-1450). Vienna, Austria: IAEA.
- International Atomic Energy Agency. (2007a). *Characterization and testing of materials for nuclear reactors* (IAEA-TECDOC-1545). Vienna, Austria: IAEA.
- International Atomic Energy Agency. (2007b). *Nuclear power plant design characteristics* (IAEA-TECDOC-1544). Vienna, Austria: IAEA.
- Lavrinenko, S. D., Pylypenko, M. M., & V'yugov, P. M. (2014). Pure metals for nuclear power. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2014(1), 153-157.

- Mahaffey, J. A. (2011). *The history of nuclear power*. New York, NY: Infobase Learning.,
- Marsden, B. J., Jones, A. N., Hall, G. N., Treifi, M., & Mummery, P. M. (2017). Graphite as a core material for Generation IV nuclear reactors. In P. Yvon (Ed.), *Structural materials for Generation IV nuclear reactors* (pp. 495-532). Woodhead Publishing.
- Nikitina, A. A., Ageev, V. S., Leontyeva-Smirnova, M. V., Sagaradze, V. V., Safronov, B. V., Chukanov, A. P., ... & Potapenko, M. M. (2008). Development of ODS ferritic-martensitic steels for innovative nuclear fast breeder reactors. In *Structural materials for innovative nuclear systems (SMINS)* (pp. 127-136). Paris, France: OECD.
- Park, J. Y. (2017). SiCf/SiC composites as core materials for Generation IV nuclear reactors. In P. Yvon (Ed.), *Structural materials for Generation IV nuclear reactors* (pp. 441-470). Woodhead Publishing.
- Toshinsky, G., & Petrochenko, V. (2012). Modular lead-bismuth fast reactors in nuclear power. *Sustainability*, 4(9), 2293-2316.
- Tsvetkov, P. V. (2021). *Nuclear materials*. London, England: IntechOpen.
- Vladimirov, P., Möslang, A., Lindau, R., Klimenkov, M., Eiselt, C., & Borodin, V. (2008). New insight on the production process of RAFM ODS steels for nuclear applications. In *Structural materials for innovative nuclear systems (SMINS)* (pp. 528-530). Paris, France: OECD.
- Yvon, P. (Ed.). (2017). *Structural materials for Generation IV nuclear reactors*. Woodhead Publishing

