

Mühendislik: Teori, Metodoloji ve Uygulama

**Editör
Prof. Dr. Alper Bideci**

Mühendislik :Teori, Metodoloji ve Uygulama

Editör

Prof. Dr. Alper Bideci

İmtiyaz Sahibi
Platanus Publishing®

Editör
Prof. Dr. Alper Bideci

Kapak & Mizanpaj & Sosyal Medya
Platanus Yayın Grubu

Birinci Basım
Ekim, 2025

Yayımcı Sertifika No
45813

ISBN
978-625-6517-51-6

©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.....	7
Kobalt (Co) Kirliliği ve Çevre Üzerine Olan Etkiler	
Serpil Savcı	
BÖLÜM 2.....	15
İklim Kaynaklı Kentsel Seller	
Serpil Savcı	
BÖLÜM 3.....	23
İklim Değişikliği ve Yeraltı Suları: Hassasiyet Değerlendirme Yöntemleri ve Uyum Stratejilerine Derinlemesine Bir Bakış	
Olca Gülçiçek Uysal	
BÖLÜM 4.....	33
Yenilenebilir Enerjide Rüzgârın Rolü: Potansiyel, Teknoloji ve Gelecekteki Yeri	
Kadir Yılmaz & Taner Dindar	
BÖLÜM 5.....	43
Endüstri 5.0 Uygulama Stratejilerinin Önceliklendirilmesi: Bulanık TOPSIS Tabanlı Bir Yaklaşım	
Kübra Tümay Ateş	
BÖLÜM 6.....	57
Mikrobiyal Yağların Fonksiyonel Özellikleri ve Endüstriyel Potansiyeli	
Yasemin Henden & Tuncay Gümüş & Deniz Damla Altan Kamer & Emel Yücel	
BÖLÜM 7.....	101
Sürdürülebilir Bölgesel Kalkınma Hedefleri Çerçevesinde Kentsel Dönüşüm Stratejileri ve Depreme Dayanıklı Kent Ekonomisi: Yalova Örneği	
Çiğdem Avcı Karataş	
BÖLÜM 8.....	121
Tekstilde Kullanılan Hammaddelerin Yıllara Göre Değişimi	
Emine BAKAN	

BÖLÜM 9..... 139

Sentinel- 1 Radar Verisi ile Savaş Sonrası Yapı Hasar Tespiti: Maripol Örneği

Gizem Eyi & İlkay Buğdaycı

BÖLÜM 10..... 155

Yeşil Enerji Üretiminde İlerlemeler ve Yakıt Hücreleri İçin Yenilikçi Malzemeler

Gamze Gündüz Meriç

BÖLÜM 11..... 175

Toprak Kalitesini ve Verimini İyileştirmek İçin Sürdürülebilir Bir Yaklaşım: Biyokömür Uygulamaları

Elif Yaman Çamlı

BÖLÜM 12..... 191

Güneş Kollektörlerinde Kullanılan Yutucu Yüzey Kaplama Malzemeleri

Recep Külcü

BÖLÜM 13..... 205

Güneş Takip Sistemleri

Recep Külcü

BÖLÜM 14..... 219

Sıcak Çalışmalarda İş Sağlığı ve Güvenliği Üzerine Bir İrdeleme

Arda YILMAZ

BÖLÜM 15..... 225

Nano Katkılı Minimum Miktarda Yağlama (NANO-MMY) Yöntemi: Sürdürülebilir İmalatta Yeni Bir Yaklaşım

Hakan Yurtkuran

BÖLÜM 16..... 243

Ar-Ge ve Dijital Dönüşüm

Elifcan Göçmen Polat & Andaç İmak & Ceren Ünlükal

BÖLÜM 17..... 257

AISI 304L Paslanmaz Çeliğin CNC Lazer ile Kesilmesinde Kullanılan Parametrelerin Etkisi

Burak Kalkan & Yunus Kayır

BÖLÜM 18.....277

**Dinamik Voltaj Regülatörleri (DVR): Güç Kalitesi Yönetiminde Temeller,
İleri Kontrol Stratejileri ve Gelecek Trendleri**

Okan Bingöl & Fatih Yoldaş

BÖLÜM 19.....299

**Derin Öğrenme ile Akıllı Sağlık Sistemleri Klinik Destek, Görüntüleme ve
Tahmin Modelleri**

Nisa Vuran Sarı & Gizen Mutlu

BÖLÜM 20.....317

Stereo Video Görüntülerini İşlemeye Dayalı Derinlik Analizi

Murat Olcay Özcan & Deniz Taşkın

BÖLÜM 21.....343

**Petrol ve Gaz Varlıklarının Yaşam Döngüsü: Enerji Geçiş Çağında Stratejik,
Çevresel ve Politik Perspektiflerin Sistematik Analizi**

Nazan Yalçın Erik



BÖLÜM 1

Kobalt (Co) Kirliliği ve Çevre Üzerine Olan Etkiler

Serpil Savcı¹

GİRİŞ

Doğada en yaygın kirleticilerden biri, önemli bir küresel çevre sorununu temsil eden ağır metallerdir. Bu ağır metaller arasında, kobalt (Co) yüksek toksisitesi ve kanserojen özellikleri nedeniyle insan sağlığı ve çevre için özellikle tehlikelidir. Endüstriyel atık sular, madencilik atıklarında ve tarımsal alanlarda Co (II) bulunması hem suda yaşayan organizmalar hem de insan refahı için önemli bir risk oluşturur. Bu nedenle, kirliliği su kaynaklarından Co (II)'yi uzaklaştırmak için etkili teknikler geliştirmek esastır. Co, pil, katalizör ve renklendirici üretimi gibi çeşitli endüstriyel proseslerde yaygın olarak kullanılan bir geçiş metalidir (Jamaloi ve ark., 2025). Toprağın ağır metallerle kirlenmesi, kentsel yayılmanın sürekli artması ve endüstriyel kuruluşların doğal çevrede bıraktığı olumsuz ekolojik ayak izleri dünya çapında bir endişe kaynağı olmuştur. Dünya çapında 10 milyondan fazla alanın kirlendiği ve bu alanların %50'sinden fazlasının ağır metaller yoluyla kirlendiği iddia edilmektedir. Topraktaki ağır metallerin uzun süreli varlığı genellikle toprağın bozulmasına neden olmaktadır. Ayrıca bu ağır metaller, sulara geçebilir, su ekosistemini, insan sağlığını ciddi şekilde tehdit ederek ekosistemin bozulmasına neden olabilir (Jiang ve ark., 2022). Bu kitap bölümünde kobaltın kaynakları, çevresel etkileri ve kobaltla kirlenmiş toprakların iyileştirme yöntemleri anlatılmıştır.

KOBALTIN (Co) DOĞAL ve ANTROPOJENİK KAYNAKLARI

Kobalt, 8,90 g/cm³ yoğunluğa sahip sert, parlak, dayanıklı ve gümüş-mavi bir metaldir. Erime noktası 1495 °C ve kaynama noktası 2927 °C'dir. Orta düzeyde termal ve elektriksel iletkenliğe sahiptir. Oda sıcaklığında altıgen sıkı paketlenmiş (hcp) kristal yapıya sahiptir (Asghar ve ark., 2024).

Kobalt nispeten nadir bir eser elementtir. Dünya kabuğundaki ortalama konsantrasyonu 25 mg Co/kg'dır. Bazik ve ultrabazik kayalar yaklaşık 100 ppm kobalt içerirken, manto tipi kayalar (bazalt) 40-50 ppm kobalt ve asidik kayalar (granit) 1-10 ppm kobalt içermektedir (Barceloux and Barceloux, 1999).

Doğal kobalt kaya, toprak, su ve bitki örtüsünde yaygın olarak bulunur. Kobalt metal iyonları, farklı oksidasyon durumlarına sahip çok sayıda inorganik

¹ Doç. Dr., Yozgat Bozok Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi,
ORCID ID: 0000-0003-2015-2223

komplekste bulunan eser elementler olarak bitkiler ve hayvanlar için gereklidir (Jiang ve ark., 2022).

Doğal olarak, çeşitli topraklardaki kobaltın ortalama konsantrasyonu 0,1 ila 100 mg/kg arasında değişir. Kobalt, kobalt içeren mineraller ve bileşikler (karbonatlar) şeklinde yaygındır. Yaygın kaya türleri arasında, ultramafik magmatik kayalar en yüksek kobalt içeriğine sahiptir.

Yüksek sıcaklık dayanıklılığı, sertlik derecesi ve işlem verimliliği gibi mükemmel özellikleri nedeniyle kobalt çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Günümüz teknolojilerini ve ekonomik stratejiyi desteklemede önemli bir rol oynar. Küresel olarak, antropojenik kaynaklar kimyasal uygulamalardan ve kobaltın alaşım imalatından kaynaklanmaktadır. Dünyada toplam ortak üretimin yaklaşık %37'si metalurjik uygulamalar için, geri kalanı ise kimyasal uygulamalar için kullanılmaktadır (Leyssens ve ark., 2017).

Metal işleme, madencilik, petrol ve doğal gaz sondajı ve inşaat endüstrileri tarafından kesici takımlar ve aşınmaya dayanıklı bileşenler olarak kullanılan kobalt kompozit bir malzemedir. Çimentolu karbürlerle ilişkili endüstrilerin de çevreye kobalt saldığı bulunmuştur.

Nikel bazlı piller için anot olarak uygulanır. Elektronik atıklar kobalt içerir ve potansiyel kobalt kirliliği kaynaklarıdır. Kimyada katalizörler, boya için kurutma maddeleri, cam renk giderici, emaye alt kaplama külçeleri, nem göstergeleri ve manyetik kayıt ortamları dahil olmak üzere kobaltın diğer kimyasal uygulamaları, yasal eşik seviyelerinin üzerindeki yüksek kobalt konsantrasyonu ile ilgilidir. Bu da çevre için önemli bir tehdit oluşturabilir. Artan kobalt madenciliğinin, uygunsuz gübre kullanımının, atık su deşarjının ve yakıtların yoğun şekilde yakılmasının bir sonucu olarak, çevredeki kobalt içeriği hızla yükselmektedir. Genel olarak, kobalt makine imalatı ve demir dışı eritme tesislerinde kritik ağır metal kirleticilerden biridir.

Kobalt içme suyunda nadir olarak tespit edilir. Mevcut olduğunda, içme suyundaki konsantrasyon 0,1–5 µg Co/L arasında değişir. Nehirlerde, göllerde ve yeraltı sularında eser miktarda kobalt bulunur. Kıyı deniz suyu genellikle nehir sularında doğal organik maddelerle çözünen kobaltın taşınması sonucunda açık okyanus sularına kıyasla daha fazla kobalt içerir. Açık okyanus sularındaki ortalama konsantrasyonlar yaklaşık 0,3 µg/L'dir. Madencilik faaliyetleri ve endüstriyel kullanım, kobaltın suda doğal taşınmasını önemli ölçüde etkilemez çünkü kobaltın çoğu sedimentlerde bulunur (Barceloux and Barceloux, 1999).

Havadaki kobalt kaynakları hem doğal (erozyon, volkanik patlamalar, orman yangınları, deniz suyu spreyi) hem de antropojeniktir (fosil yakıt yakma, motor emisyonları, kanalizasyon çamuru, fosfatlı gübreler, kobalt içeren alaşımların işlenmesi). Ortam havasındaki kobalt konsantrasyonu, parçacıkların rüzgârla

toprağa dağılmasına bağlıdır. Tipik olarak, havadaki ortalama konsantrasyon kentsel alanlarda daha düşük konsantrasyonlardadır (yaklaşık 1–2 ng Co/m³) (Barceloux and Barceloux, 1999).

KULLANIM ALANLARI

Kobalt, çok çeşitli uygulamalarda kullanılan endüstriyel açıdan önemli bir metalik elementtir. Kobalt, alaşımların sertliğini ve ısı direncini artırır. Yaygın olarak ısıya dayanıklı alaşımlar, çimentolu karbürler ve manyetik malzemelerin üretiminde kullanılır. Seramik ve cam endüstrilerinde kobalt, canlı mavi bir renk üretme kabiliyeti nedeniyle renklendirici madde olarak kullanılır. Co-60, özellikle kanser tedavisinde radyoterapide kullanılan bir radyoizotoptur. Kobalt ve bileşikleri ayrıca kimya endüstrisinde petrol rafinerisi, amonyak sentezi ve diğer kimyasal işlemler için katalizör olarak kullanılır. Kobalt, elektrokimyasal kararlılığı ve katalitik aktivitesi nedeniyle elektrokimyasal sensörlerde ve elektrokaplama işlemlerinde kullanılır. Lityum iyon pillerde kobalt kullanımı, şarj döngüsü süreci boyunca yüksek elektriksel iletkenlik ve kararlı yapısal kararlılık sağlayan bir LiCoO₂ (LCO) katod görevi görebilir (Shi ve ark., 2025). Elektrikli araçlar ve yeni enerji teknolojileri hızla ilerledikçe, kobalta olan pazar talebi büyümeye devam etmektedir (Zou ve ark., 2024).

ÇEVRESEL ve SAĞLIK AÇISINDAN ETKİLER

Kobalt, ağır metal çevre kirleticisidir. Kobalt, pil, madencilik, boya, pigment, alaşım, elektro kaplama ve seramik endüstrilerinde kullanılır. Sonuç olarak, bu endüstriler tarafından boşaltılan sıvı atıklarda bulunabilir ve sonunda çevreye karışabilir. Ancak, kobalt içeren atıkların uygunsuz şekilde bertaraf edilmesi çevre kirliliğine ve sağlık risklerine yol açabilir. Kobalt, düzgün yönetilmediği takdirde insan sağlığı ve çevre için ciddi tehditler oluşturabilen son derece toksik ve kanserojen bir ağır metaldir. Metal kaplama, madencilik ve pil üretimi gibi birçok farklı sektörde yaygın kullanımı nedeniyle atık sular daha yüksek miktarlarda Co (II) içermektedir ve bu da doğal su yollarına deşarj edilmeden önce etkili bir şekilde arıtılması gerekmektedir (Jamaloi ve ark., 2025).

Kobalt küçük miktarlarda (günde 0,015 mg) metabolik süreçler için gereklidir. Örneğin, B12 vitamininin önemli bir bileşenidir. Bununla birlikte, yüksek kobalt konsantrasyonları solunum semptomları, akciğer lezyonları, kalp hastalığı, iştih ve görme kaybı, böbrek, karaciğer ve tiroid hasarı gibi çeşitli istenmeyen etkilere neden olabilir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO), içme suyundaki maksimum kobalt konsantrasyonunun 0,05 mg/L olmasını önermektedir. Bu nedenle, kobalt açısından zengin atık suyun sulu ortamlara deşarj edilmeden önce arıtılması hayati önem taşımaktadır (Rethinasabapathy ve ark., 2025).

Madencilik alanlarında üretilen atık su genellikle büyük miktarda metal iyonu içerir ve bunların geleneksel fiziksel ve kimyasal yöntemlerle ortadan kaldırılması genellikle zordur. Şu anda, dünyadaki birçok ülke ve bölge metal kirliliği tehdidi altındadır. Metaller genellikle kolay birikim, zor bozunma ve güçlü tolerans gibi özelliklere sahiptir. Ortama deşarj edildikten sonra, besin zinciri yoluyla insan sağlığını tehdit edebilirler. Örneğin, yüksek kobalt kirliliği seviyeleri saç dökülmesine, anemi ve lösemi gibi kan hastalıklarına ve ciddi vakalarda ölüme bile yol açabilir (Zeng ve ark., 2025).

Kobalt geri kazanımında nükleer operasyon sırasında radyoaktif kobalt olarak gelmektedir. Nükleer atıktan salınan kobalt radyonüklidleri; ^{56}Co , ^{57}Co , ^{58}Co ve ^{60}Co 'dır. ^{60}Co 'ın düşük konsantrasyonlarda bile varlığı büyük endişelerden birisi olarak görülmektedir. Kobalt, hem karbon çeliğinde (80–150 ppm) hem de paslanmaz çelikte (230–2600 ppm) eser bir bileşendir. Reaktör çalışması sırasında üretilen radyoaktif kobalt, potansiyel bir radyasyon maruziyeti kaynağıdır. ^{60}Co 'nun çevreye salınması, ishal, düşük tansiyon, akciğer tahrişi ve canlı hücrelerde genetik mutasyon gibi sağlık sorunlarına neden olabilir (Asghar ve ark., 2024).

Toz halindeki kobaltın canlılar tarafından solunması sonucunda kobalt zehirlenmesi gerçekleşmektedir. Toz halinde vücuda alınan kobalt elementi canlı akciğerlerinde çözünerek kana ve idrara karışabilir. Uzun süre bu toza maruz kalmak kronik bronşite ve alerjik tepkilere neden olabilmektedir. Yapılan deneysel çalışmalarda kobalt metalinin ve suda çözünür kobalt bileşiklerinin hayvanlarda kanser hastalığına yol açtığı kanıtlanmıştır. Kobalt vücutta karaciğer, kırmızı kan hücreleri, dalak, böbrek ve pankreasta depolanabilir. Sebzeler, et, balık, süt, deniz yosunları, midye, karaciğer, istiridye ve böbrek kobalt içerebilmektedir. Sigara dumanında da kobalt bulunmaktadır (Seven ve ark., 2018).

TOPRAK İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Günümüzde, toprak yıkama ve elektroremediasyon, kobaltı topraktan ayırmak ve topraktaki konsantrasyonunu azaltmak için iki etkili tekniktir. Toprak yıkama, esasen fiziksel ve kimyasal proseslerle harmanlanmış bir hacim azaltma/ağır metal konsantrasyonu azaltma iyileştirme teknolojisidir (Jiang ve ark., 2022).

Toprak yıkama, kirlenmiş ortamdan ağır metali tamamen azaltmak için alternatiflerden biri olarak tahmin edilmiştir. Ancak, kritik dezavantajları vardır. Özellikle, toprağın silt/kil fraksiyonundaki performansı sınırlıdır ve işlem sırasında üretilen atık su, içindeki ağır metal ve şelat arasındaki yoğun kombinasyon nedeniyle ele alınması zordur. Toprak yıkama ile işlenen toprak, organik madde ve besin kaybı nedeniyle yeniden bitkilendirme için uygun değildir (Jiang ve ark., 2022).

Elektroremediasyon, 1980'lerin sonlarından beri uygulanan ağır metalleri veya metaloidleri topraktan ayırmak ve çıkarmak için kullanılan fiziksel bir tekniktir. Elektrik alanı gradyanı altında, toprak çözeltilerindeki metal katyonları katoda çekilir. Elektroremediasyonun mekanizmaları, yüklü parçacıkların, kimyasal reaktiflerin ve toprak çözeltilisinin hareketine dayanan elektroforez, elektro-göç, elektroozmoz ve elektrolizi içerir. Özellikle, elektroforez esas olarak yüklü kolloidal parçacıkların hareketini içerirken, elektro-göç, anyonların ve katyonların toprak suyundaki zıt yüklü elektrotlara doğru hareket ettiği süreci ifade etmektedir (Yao ve diğerleri, 2012).

Elektroremediasyon, toprağın orijinal doğasına daha az zarar vererek ve kısa sürede daha az ikincil kirleticiler açığa çıkararak iyileştirme için kullanımı kolay olmasına rağmen, yüksek enerji maliyeti ve gerçek toprak koşullarından kaynaklanan sınırlamalar tekniğin uygulanmasını kısıtlamaktadır (Jiang ve ark., 2022).

Fitoremediasyon, 1970'lerde ağır metalle kirlenmiş toprakları iyileştirmek ve sulak alanlardan ağır metallerin giderimi için kullanılan bir yöntemdir. Yıllar geçtikçe, fitoremediasyon ilgi görmeye başlamıştır. Teknoloji prensipleri ve uygulama durumu hakkında yapılan incelemelerin artmasıyla daha da gelişmiştir. Fitoremediasyon, topraktan ağır metalleri parçalamak, çıkarmak, adsorbe etmek veya sabitlemek için doğal veya modifiye edilmiş bitkileri kullanan çevre dostu bir teknolojidir. Fitoremediasyon, hava, iklim koşulları, toprak özellikleri ve alanların sonraki kullanım senaryolarına müdahale etmesine rağmen, bitki bazlı teknik, toprak kazısı gibi yıkıcı uygulamalara kıyasla kirlenmiş alanların iyileştirilmesi için ekonomik, yerinde ve çevre dostu bir teknoloji olarak kabul edilmektedir. Fitoremediasyon, kobaltla kirlenmiş topraklar için önde gelen teknolojidir. En etkili bitkileri ve işletme parametrelerini keşfetmek için çeşitli araştırmalar yürütülmüştür (Jiang ve ark., 2022).

Fito-stabilizasyon, ağır metallerin hareketliliğini ve biyoyararlanımını azaltmayı ve daha fazla dağılmasını önlemeyi amaçlayarak kirleticileri toprakta tutmaktadır. Kobalt, bitkilerde veya kök bölgesinde belirli ağır metallerin birikim yeteneğine göre köklerde hareketsizleştirilir. Genel olarak, fito-stabilizasyon için uygun bitkiler, ağır metalin dağılmasını engellemek için yeraltı kısımlarında ağır metal toplayabilen türlerdir. Örneğin yüksek kobalt seviyesine sahip toprakta yetişen *Festuca rubra*, L. kobalt için bir fito-stabilizatördür. Sabitleme esas olarak kök yüzeyinde adsorpsiyon, büyüme ve terleme sürecinde gerçekleşebilir. Ancak altta yatan spesifik moleküler mekanizmalar hala belirsizdir. Ayrıca kökler tarafından boşaltılan organik asitler, sideroforlar ve fenolikler gibi doğal şelatlar kobaltla kompleksler oluşturabilir. Kobaltın dağılımı, bitkilerde kök ve sürgün arasındaki kobalt taşınmasının kısıtlanmasına rağmen organik komplekslerle ilişkili olabilir (Jiang ve ark., 2022).

Fitoekstraksiyon, toprak metalini fito-kullanılabilir olmayan formlara dönüştürmeye çalışan fito-stabilizasyonla karşılaştırıldığında, önemli miktarda ağır metalin giderilmesini sağlamak için yer üstü kısımlarda ve hasat edilebilir biyokütlede ağır metal biriktirmek için belirli bitkileri kullanır. Kobaltın fito-ekstraksiyon sürecinde hızlı büyüyen bitkiler kullanılır (Jiang ve ark., 2022).

Toprak yıkama teknolojisi, su bazlı kazılmış toprağa uygulanan ve toprakta çok sayıda inorganik, organik ve radyoaktif kirleticilerin uzaklaştırılmasında etkili olan, klasik kimyasal-fiziksel ekstraksiyon ve ayırma proselerini içermektedir. Kazılmış topraktaki kirleticileri ayırmak için, su bazlı teknoloji, kirleticilerin çözünürlük özelliklerini veya mekanik prosesleri kullanmaktadır (Seven ve ark., 2018).

SONUÇLAR

Kobalt kirliliği gerek toprak, gerekse de sularda, doğal süreçler ve antropojenik aktiviteler tarafından katkıda bulunulan doğal çevre ve insan sağlığı için riskler oluşturabilir. Kobaltın neden olduğu kirliliği en aza indirmek için acil önlemler almak gerekmektedir. Ayrıca ilerde yapılacak olan çalışmalarda arıtım ve geri kazanım yöntemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Jiang, M., Wang, K., Wang, Y., Zhao, Q., & Wang, W. (2022). Technologies for the cobalt-contaminated soil remediation: A review. *Science of the Total Environment*, 813, 151908.
- Zeng, H., Wu, Q., Liu, R., Peng, Y., Zhu, F., & Ran, F. (2025). Remediation of cobalt (II) by *Myriophyllum spicatum* and its secondary utilization in supercapacitor. *Journal of Energy Storage*, 109, 115185.
- Rethinasabapathy, M., Ghoreishian, S. M., Kwak, C. H., Han, Y. K., Roh, C., & Huh, Y. S. (2025). Recent progress in advanced functional materials for adsorption and removal of cobalt from industrial and radioactive effluents. *Coordination Chemistry Reviews*, 527, 216401.
- Leyssens, L., Vinck, B., Van Der Straeten, C., Wuyts, F., Maes, L., 2017. Cobalt toxicity in humans-a review of the potential sources and systemic health effects. *Toxicology* 387, 43–56.
- Yao, Z., Li, J., Xie, H., Yu, C., 2012. Review on remediation technologies of soil contaminated by heavy metals. In: Jinhui, L., Hualong, H. (Eds.), *Procedia Environmental Sciences*. 16, pp. 722–729.
- Asghar, K., Ngulimi, M. F., Kim, S., Seo, B. K., & Roh, C. (2024). Cobalt recovery from industrial and nuclear waste resources: A review. *Chemical Engineering Journal Advances*, 100668.
- Jamaloji, J. Y., Samani, M. R., & Toghraie, D. (2025). Experimental study on cobalt adsorption by bone powder modified with poly Pyrrole and polyethylene glycol. *Results in Engineering*, 25, 104382.
- Shi, Y., Wang, R., Mao, S., Jiang, F., Yang, S., Zhu, X., Zhao, K. (2025). Recovery of different cobalt products in one spot from cobalt waste: Low carbon electrolysis technology. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 116389.
- Zou, J.Q., Yuan, B.E., Zhao, C.X., (2024) Recycling the spent cobalt-based perovskites for the high-active oxygen catalysts in zinc-air batteries, *J. Clean. Prod.* 462, 142685.
- Asghar, K., Ngulimi, M. F., Kim, S., Seo, B. K., & Roh, C. (2024). Cobalt recovery from industrial and nuclear waste resources: A review. *Chemical Engineering Journal Advances*, 100668.
- Seven, T., Can, B., Darende, B. N., & Ocak, S. (2018). Hava ve toprakta ağır metal kirliliği. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 1(2), 91-103.
- Barceloux, D. G., Barceloux D., (1999). Cobalt. *Journal of Toxicology: Clinical Toxicology*, 37 (2), 201-216.



BÖLÜM 2

İklim Kaynaklı Kentsel Seller

Serpil Savcı¹

GİRİŞ

Dünyanın ısındığı ve artan sera gazı emisyonları nedeniyle, ikliminin hızla değiştiği konusunda giderek artan bir fikir birliği bulunmaktadır. Bu emisyonların çoğu kontrolsüz insan faktörlerinden kaynaklanmaktadır (Desta ve Molla, 2023).

İklim değişikliği, insan faaliyetlerinin Dünya'yı önemli ölçüde değiştirdiği ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. İklim değişikliği, çevre, tarım ve altyapı sektörleri de dâhil olmak üzere hem insan hem de doğal sistemleri etkilemektedir (Desta ve Molla, 2023). Gezegenimizi hızla değiştirmektedir. Bu durum, artan küresel sıcaklıklar, yağış düzenlerindeki değişiklikler ve aşırı hava olayları nedeniyle önemli bir endişe kaynağıdır. Yoğun nüfusları ve yaygın yapılaşmalarıyla kentsel alanlar bu değişikliklere karşı özellikle savunmasızdır. Modern kentleşme eğilimi, bu iklim değişimleri nedeniyle artık daha yüksek bir sel riskiyle karşı karşıya olan büyük şehirler yaratmıştır (Dharmarathne ve ark., 2024). Özellikle kıyı alanlarındaki şehirler, deniz seviyesinin yükselmesi, sel, erozyon ve fırtına dalgaları gibi iklim kaynaklı risklere karşı oldukça savunmasızdırlar. Bunun nedeni coğrafi şekilleri ve konumlarıdır (Morim ve ark., 2021).

Bu kitap bölümünde, iklim değişikliğinden kaynaklı kentsel sellerin etkileri anlatılmıştır.

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ ve ŞEHİR SELLERİ

Aşırı sel, insan toplumu için en ciddi felaketlerden biridir ve son yıllarda insan yaşamlarına yönelik sürekli tehditlere ve ekonomiye yaygın zararlara yol açmıştır. Bu nedenle aşırı sellerle mücadele küresel bir endişe haline gelmiş olup, sellere karşı risk yönetimi için etkili bir çerçeveye ihtiyaç duyulmaktadır. Yoğun sosyoekonomik faaliyetlerin merkezi olan kentsel alanlar, iklim değişikliği nedeniyle sel riski yönetiminde önemli bir zorlukla karşı karşıyadır. Kentsel alanlar, yağmur suyunun toprağa sızmasını önleyen yüksek oranda geçirimsiz yüzey içerir ve bu da yüzey akışında artışa neden olur. Özellikle taşkın yataklarında nüfusun yoğunlaşması göz önüne alındığında, kentsel alanlardaki aşırı seller insan yaşamı ve ekonomik faaliyetler için önemli bir tehdit oluşturmakta ve değişen iklimler altında kentsel sel kontrolünü acil bir sorun haline getirmektedir (Yang ve ark., 2024).

¹ Doç. Dr., Yozgat Bozok Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi,
ORCID ID: 0000-0003-2015-2223

İklim değişikliğinin etkileri genellikle kentsel ve kentsel olmayan alanlar arasında farklılık gösterecektir. Çeşitli  alışmalar, küresel ısınma nedeniyle şehirlerde kentsel olmayan alanlara kıyasla iklimsel aşırılıklarda daha fazla artış olduğunu belirtmiştir.

Bazı  alışmalar, kentsel alanlarda sel baskınlarının zirvelerinde ve bunlara bağlı tekrarlarma dönemlerinde artış potansiyeli olduğunu göstermiştir. Sel baskınlarındaki artış, hem kentleşmenin bir sonucu olarak arazi kullanımındaki değişikliklerden hem de iklim değişikliği nedeniyle aşırı yağış olaylarındaki artışlardan kaynaklanabilir. Göreceli etkiler, kentsel gelişimin sürdürülebilirliğine bağlı olacaktır. Kentleşmenin sel zirvelerine ve sıklığına katkısı, sürdürülemez şehirlerde daha yüksek olacaktır.  alışmalar, gelecekteki kentsel sellerde olası büyük bir artış olduğunu ortaya koymuştur. Birçok şehir için öngörülen sel riski artışı yüksektir (Pour ve ark., 2020).

İklim değişikliği hidrolojik döngüyü değiştirmektedir. Bu durum, aşırı hava olaylarının şiddetinde ve sıklığında artışa neden olmakta ve bu da artan bir sel riski oluşturmaktadır. 1960'ların başından bu yana, mevcut kayıtlar küresel olarak sel olaylarının sayısında bir artış olduğunu göstermektedir ve bu durum 1990'lardan bu yana yoğunlaşan bir eğilimdir. Soğuk bölgelerde, atmosferik ısınma hem kar birikimini hem de kar erimesi dinamiklerini değiştirmektedir (Zaqout ve 'Ol'of Andrad'ottir, 2024).

ÇEVRESEL ETKİLER

Doğal afetlerin en tehlikelilerinden biri olan seller, küresel olarak insan yaşamını, ekonomileri, ekosistemleri ve çevreyi etkilemeye devam etmektedir. Seller, on binlerce  l me ve çeşitli halk sağlığı sorunlarına en büyük katkıda bulunan faktör olmasının yanı sıra, doğal afetler arasında ekonomik kayıpların da en büyük tek nedenidir. Sellerden kaynaklanan ortalama küresel kaybın yıllık 104 milyar ABD doları olduğu tahmin edilmekte ve kentleşme, ekonomik büyüme ve iklim değişikliğiyle birlikte yüzyılın sonuna kadar artması beklenmektedir (Ghazi ve ark., 2023).

Kentsel su baskınları, küresel olarak şehirlerin karşı karşıya olduğu iklim kaynaklı tehlikelerden birisi olarak düşünülmektedir. Bu durum derin sosyal, ekonomik ve çevresel etkilere yol açmaktadır. İklim değişikliği ve hızlı kentleşmenin tetiklediği sel olaylarının artan sıklığı, yoğunluğu ve öngörülemezliği, kentsel sistemlerin uyum kapasitelerini zorlamaktadır. Birleşmiş Milletler Habitat, 2050 yılına kadar küresel nüfusun % 70'inden fazlasının kentsel alanlarda yaşayacağını ve bu artışın % 90'ından fazlasının Güney'deki şehirlerde yoğunlaşacağını öngörmektedir. Aynı zamanda, aşırı yağış olayları ve deniz seviyesindeki artış yoğunlaşarak sel risklerini önemli  l de artırmıştır. IPCC (IPCC, 2021), küresel ortalama deniz seviyesinin 1900'den bu

yana yaklaşık 21 cm yükseldiğini tahmin etmektedir. Bu dinamikler, Cape Town, Jakarta, Lagos, Dakka, Mumbai, Maputo, Abidjan ve Bangkok gibi kıyı şeridindeki şehirleri ve nehir bölgelerini daha yüksek risk altında olduğunu açıkça göstermektedir. Yaklaşık bir milyar insana ev sahipliği yapan gayri resmi yerleşimler, marjinal arazilerdeki konumları, yetersiz drenaj altyapısı ve köklü sosyoekonomik güvencesizlik nedeniyle özellikle savunmasız durumdadır (Bhanye, 2025).

İklim değişikliği nedeniyle, dünya genelindeki kıyı topluluklarının sellerden giderek daha fazla etkilenmesi beklenmektedir. Hatta bazıları hali hazırda devam eden iklim değişikliğine karşı savunmasız kabul edilmektedir. İklim değişikliğinin, artan gelgit taşkınları, sel sıklığı, erozyon, yükselen su seviyeleri, tuzlu su girişi, fırtına dalgaları ve artan siklon sıklığıyla birlikte deniz seviyesinin hızla yükselmesine neden olması beklenmektedir. Bunun yanı sıra, nüfus artışı ve artan kentleşme deniz ve kıyı bozulmasına neden olmaktadır (Balica ve ark., 2012).

Kıyı taşkınlarına maruz kalmanın yüksek olduğu kıyı bölgelerinin nüfusu oldukça yüksektir. Dünya genelinde kıyı göçü nedeniyle etkilenen insan sayısının artması muhtemeldir. Bir yandan, maruz kalan nüfusların bir kısmı, dayanıklılık stratejisinin bir parçası olan çeşitli yapısal ve yapısal olmayan önlemlerle taşkınlardan korunmaktadır. Diğer yandan, bazılarının hiç taşkın savunması yoktur veya yalnızca zayıf taşkın savunmaları vardır ve maruz kalan nüfuslar daha sık taşkınlara maruz kalmakta ve bunun sonucunda aksamalar, ekonomik kayıplar ve can kayıpları yaşanmaktadır. Kıyı taşkınları evlerin yıkılmasına, iletişimde, tarımsal üretimde aksaklıklara ve hatta ölümlere neden olabilir. Ekonomik bileşen ise gelirle veya etkilenmeye yatkın ekonominin doğasında bulunan konularla ilgilidir. Kıyı taşkınlarından olumsuz etkilenebilecek birçok ekonomik faaliyet vardır. Bunlar arasında turizm, balıkçılık, denizcilik, sanayi, tarım, içme suyu bulunabilirliği yer almaktadır (Balica ve ark., 2012).

İklim kaynaklı kıyı tehlikelerinin su, tarım, kıyı ekosistemleri, biyolojik çeşitlilik ve kıyı altyapıları üzerinde yıkıcı etkilere sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca, kıyı topluluklarının balıkçılık ve turizm sektörlerinin yanı sıra gelir, gıda güvenliği, sağlık ve göçü de önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. İklim değişikliği ve değişkenliği, suyun zamanlamasını, miktarını ve kalitesini büyük ölçüde olumsuz etkilemektedir. Ayrıca, yağış, akış ve buharlaşma gibi su dengesi bileşenlerini ve tortu ve besin yükleri gibi su kalitesi bileşenlerini de etkilemektedir.

Özellikle sıcaklık ve yağış yoğunluğu, yüzey akışını, akarsu akışını, tortuyu ve toplam fosfor yükünü artırmaktadır. İklim kaynaklı aşırı olaylar, özellikle kuraklık, aşırı yağış, deniz seviyesinin yükselmesi, artan sıcaklıklar ve deniz yüzeyi tuzluluğundaki değişiklikler, kıyı balıkçılığı faaliyetleri üzerinde

doğrudan ve dolaylı etkilere sahiptir. Buna bağılı olarak su ürünleri yetiştiriciliğı üretimini sürdürülebilirliğini etkileyebilmektedir. Ayrıca, yapılan çalışmalar balıkçılık ve çiftçilik yapan toplulukların geçim kaynaklarının kıyı tehlikelerinden aşırı derecede etkilendiğini belirtmiştir. İklim kaynaklı kıyı tehlikelerinin balıkçılık sektörü üzerindeki dolaylı etkileri, türlerin üretimi, etkileşimi, dağılımı ve bolluğı üzerindedir. Ayrıca, hastalık salgınlarının, esas olarak sıcak hava dalgaları ve aşırı yağış nedeniyle ortaya çıkabilen dolaylı etkilerden biri olduğı da belirtilebilir. Tayfunlar ve seller, göletlere, ekipmanlara ve altyapılara zarar vererek su ürünleri yetiştirme sistemlerini tahrip edebilir. Yapılan çalışmalar, iklim kaynaklı kıyı tehlikelerinin kıyı balıkçılığı ve su ürünleri yetiştirme faaliyetlerini olumlu veya olumsuz yönde etkileyebileceğini ortaya koymuştur. Olumlu etkiler, belirli iklim kaynaklı kıyı tehlikelerinin yarattığı tür, balıkçılık ve su ürünleri yetiştirme alanlarındaki değişikliklerle ilişkilidir. Tarım sektörüyle ilgili olarak, yetersiz yağış nedeniyle tarımsal verimliliğın azaldığı görülmüştür. Örneğın, Tanzanya'nın Pande köyündeki çiftçiler geçmişte dönüm başına 5-10 torba mısır elde ederken, verimlilik dönüm başına 3-4 torbaya düşmüştür. İklim değişikliğının etkisinin yanı sıra, geliştirilmiş tohum, tarım aletleri, gübre, tarım kimyasalları eksikliği, yetersiz yayım hizmetleri, güvenilir pazarlar ve kötü yol altyapısı gibi iklim dışı faktörler de Tanzanya'daki çiftçilerin tarımsal verimliliğini etkilemektedir. Sıcaklık artışı, son derece düzensiz yağışlar, seller ve sık kuraklık olayları, ürün istilasına ve hastalıklara yol açmaktadır (Maulu ve ark., 2021; Jakaria ve İslam, 2017).

SONUÇLAR

Son yıllarda, küresel olarak şehirlerin giderek daha fazla yağmur sularının oluşumuna ve etkilerine maruz kaldığı yaygın olarak görülmektedir. Gözlemlenen risk değişikliklerinin farklı faktörlerin bir kombinasyonundan kaynaklandığı açıktır. Bunlar arasında, aşırı yağış olaylarının sıklığında ve yoğunluğında artışa yol açan ve devam eden iklim değişikliği, genel nüfus artışı, 20. yüzyılın sonları ile 21. yüzyılın başlarındaki yüksek kentleşme oranları yer almaktadır. Dolayısıyla, kentsel arazi örtüsünün kapsamı önemli ölçüde artarken, aynı zamanda dünya çapında şehirlerdeki varlık ve ekonomik faaliyet yoğunlukları da hızla artmıştır. Kentsel gelişim ve daha fazla kentsel yoğunlaşmadaki mevcut eğilimlerin, toprak sızdırmazlığı da dâhil olmak üzere, dünyanın tüm bölgelerinde devam etmesi öngörülmektedir. Sonuç olarak, kentsel alanların gelecekte sellere karşı daha da savunmasız hale gelmesi beklenmektedir (Kaspersen ve ark., 2017).

Çevre dostu altyapı oluşturmak ve sürdürülebilir kentsel planlamayı dâhil etmek, iklim zorluklarına etkili bir şekilde yanıt veren şehirlerin geliştirilmesinin önemli unsurlarıdır. Bu yaklaşımlar, iklim değişikliği ve kentsel sellerin etkilerini

ele alma ve bunlara uyum sağlama konusunda bir dizi avantaj sunabilir (Dharmarathne ve ark., 2024).

Gelecekte şehirler giderek daha fazla sürdürülebilir yaklaşımlar kullanma amacıyla inşa edilmektedir. Bu nedenle, mavi-yeşil yağmur suyu ve doğa temelli çözümler, kentsel alanlarda artan sel riskine karşı etkili önlemler olarak görülmeye başlanmıştır (Dawson ve ark., 2011; Berndtsson ve ark., 2019).

İklim değışikliğiyle mücadelede ilerleme kaydedilmiş olsa da, birçok Avrupa şehri Paris Anlaşması'nda belirtilen hedeflere ulaşmada hala zorluklarla karşı karşıyadır ve bu durum, en ciddi etkileri azaltmak için daha fazla çaba gösterilmesini gerektirmektedir (Laino ve Iglesias, 2023).

KAYNAKLAR

- Desta, G., Molla, E. (2023). Climate-Induced Coastal Hazards, Impacts and Adaptation Responses: A Systematic Review.
- Dharmarathne, G., Waduge, A. O., Bogahawaththa, M., Rathnayake, U., Meddage, D. P. P. (2024). Adapting cities to the surge: A comprehensive review of climate-induced urban flooding. *Results in Engineering*, 22, 102123.
- Ghazi, B., Przybylak, R., Oliński, P., Chorążyczewski, W., Pospieszyńska, A. (2023). An assessment of flood occurrences in Poland in the 16th century. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 50, 101597.
- Morim, J., Sean Vitousek, L. E., Mark Hemer, Borja Reguero, M. Casas-Prat, T. S. Xiaolan L Wang, Alvaro Semedo, Nobuhito Mori, L. Mentaschi, and Ben Timmermans, (2021). Global-scale changes to extreme ocean wave events due to anthropogenic warming open access Global-scale changes to extreme ocean wave events due to anthropogenic warming, *Environ. Res. Lett.*, vol. 16, p. 074056.
- IPCC. Climate change (2021). the physical science basis. Contribution of working group i to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press.
- Bhanye, J. (2025). Flood-tech frontiers: smart but just? A systematic review of AI-driven urban flood adaptation and associated governance challenges. *Discover Global Society*, 3(1), 59.
- Kaspersen, S., Høegh Ravn, P., N., Arnbjerg-Nielsen, K., Madsen, H., Drews, M. (2017). Comparison of the impacts of urban development and climate change on exposing European cities to pluvial flooding. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(8), 4131-4147.
- Laino, E., Iglesias, G. (2023). Extreme climate change hazards and impacts on European coastal cities: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 184, 113587.
- Balica, S. F., Wright, N. G., Van der Meulen, F. (2012). A flood vulnerability index for coastal cities and its use in assessing climate change impacts. *Natural hazards*, 64(1), 73-105.
- Maulu, S., Hasimuna, O. J., Haambiya, L. H., Monde, C., (2021). Climate Change Effects on Aquaculture Production : Sustainability Implications , Mitigation , and Adaptations, *Front. Sustain. Food Syst.*, 5, 1–16.
- Pour, S. H., Abd Wahab, A. K., Shahid, S., Asaduzzaman, M., & Dewan, A. (2020). Low impact development techniques to mitigate the impacts of climate-change-induced urban floods: Current trends, issues and challenges. *Sustainable Cities and Society*, 62, 102373.

- Jakariya M., Nazrul Islam, M., (2017). Evaluation of climate change induced vulnerability and adaptation strategies at Haor areas in Bangladesh by integrating GIS and DIVA model, *Model. Earth Syst. Environ.*
- Dawson, R.J., Ball, T., Werritty, J., Werritty, A., Hall, J.W., Roche, N., 2011. Assessing the effectiveness of non-structural flood management measures in the Thames Estuary under conditions of socio-economic and environmental change. *Glob. Environ. Chang.* 21, 628–646.
- Berndtsson, R., Becker, P., Persson, A., Aspegren, H., Haghighatafshar, S., Jönsson, K., Tussupova, K. (2019). Drivers of changing urban flood risk: A framework for action. *Journal of environmental management*, 240, 47-56.
- Yang, W., Zhao, Z., Pan, L., Li, R., Wu, S., Hua, P., Zhang, J. (2024). Integrated risk analysis for urban flooding under changing climates. *Results in Engineering*, 24, 103243.
- Zaqout, T., & Andradóttir, H. Ó. (2024). Impacts of climate change on winter flood mechanisms: Spatial variability, trends, and bivariate frequency of rain-on-snow and soil frost. *Journal of Hydrology*, 638, 131439.



BÖLÜM 3

İklim Değişikliği ve Yeraltı Suları: Hassasiyet Değerlendirme Yöntemleri ve Uyum Stratejilerine Derinlemesine Bir Bakış

Olca Gülçiçek Uysal¹

1. Giriş

İklim değişikliği, su kaynaklarının miktarı, kalitesi ve mekânsal dağılımı üzerinde önemli değişimlere neden olmakta ve bu etkiler özellikle yeraltı suyu sistemlerinde daha karmaşık biçimde hissedilmektedir (Kundzewicz et al., 2008). Dünya genelinde artan sıcaklık eğilimleri, değişen yağış rejimleri ve hidrolojik döngüdeki belirsizlikler, yeraltı suyu seviyelerinde düşüşe ve beslenme süreçlerinde aksamalara yol açmaktadır (Taylor et al., 2013; de Graaf et al., 2017).

Yeraltı suyu, özellikle yarı kurak ve kurak bölgelerde içme suyu ve tarımsal sulama açısından temel bir kaynaktır. Ancak, bu kaynaklar üzerindeki iklim temelli stres, yalnızca su miktarını değil, aynı zamanda suyun kalitesini de etkilemektedir. Örneğin, kuraklık koşullarında kirleticilerin konsantrasyonu artarken, ani taşkınlarla birlikte yüzey kirleticileri daha hızlı bir şekilde akiferlere ulaşabilmektedir (Asoka et al., 2017; Crosbie et al., 2013).

Bu bağlamda, yeraltı suyu sistemlerinin iklim değişikliğine karşı duyarlılığının ve uyum kapasitesinin bilimsel olarak değerlendirilmesi kritik öneme sahiptir. Hassasiyet değerlendirme modelleri, bu ihtiyaca yanıt veren temel araçlardan biri olarak gelişmiştir. DRASTIC, GOD, SINTACS, AVI gibi indeks temelli modellerin yanı sıra MODFLOW, SWAT, AHP ve yapay zekâ tabanlı yaklaşımlar hem kırılganlık haritalarının oluşturulmasına hem de karar destek sistemlerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır (Scibek & Allen, 2006; Soundala & Saraphirom, 2022).

Bu çalışma, yukarıda anılan modellerin yetkinliklerini ve kısıtlarını ele alarak, yeraltı sularının hassasiyetini değerlendirme çabalarını derlemekte; ayrıca iklim değişikliğinin öngörülen etkileri altında önerilen uyum stratejilerini değerlendirmektedir.

2. Yeraltı Suyu ve İklim Değişikliği Etkileşimi

Yeraltı sularının iklim değişikliğine karşı duyarlılığı, hidrolojik döngü içindeki yavaş ve gecikmeli tepkileri nedeniyle özel bir önem taşımaktadır.

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Mersin Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü
ORCID: 0000-0001-9032-4241

Akiferler, yüzey suyu sistemlerine kıyasla iklimsel değişimlere daha uzun vadeli ve sönümlenmiş tepkiler verir; bu da yönetim ve müdahale süreçlerinde belirsizlikleri artırır (Green et al., 2011). Özellikle yarı kurak ve kurak bölgelerde yeraltı suyuna olan bağımlılık arttıkça, bu sistemler üzerindeki iklim temelli stres daha da belirgin hale gelmektedir (Ferguson & Maxwell, 2012).

Yeraltı suyu sistemleri, başlıca iki yönden iklim değişikliğinden etkilenir: niceliksel (yenilenme oranı ve çekim dengesi) ve niteliksel (su kalitesi, tuzluluk, kirletici yükü). Arazi kullanım değişiklikleri, artan buharlaşma ve azalan yağış gibi faktörler, yeraltı suyu rezervlerinin sürdürülebilirliğini tehdit ederken; sıcaklık artışı ve tarımsal kimyasal kullanımı su kalitesini doğrudan etkilemektedir (Jiménez-Martínez et al., 2022).

Çalışmalar, özellikle RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryoları altında birçok bölgede yeraltı suyu seviyelerinde belirgin düşüşler yaşanabileceğini ortaya koymaktadır (Döll et al., 2018; Neukum & Azzam, 2009). Örneğin, Orta Avrupa ve Hindistan'daki büyük akiferlerde yapılan modelleme çalışmaları, 2050 sonrası dönemde %20'ye varan beslenme azalması ve bazı bölgelerde kuruma riski göstermektedir (Portmann et al., 2013).

İklim değişikliğinin yeraltı suyuna etkilerini anlamada “yenilenme oranı” (recharge) en kritik parametrelerden biridir. Recharge miktarının belirlenmesi, yağış yoğunluğu, toprak geçirgenliği, bitki örtüsü ve arazi eğimi gibi faktörlere bağlı olup, iklimsel değişkenlik bu faktörleri doğrudan etkileyebilir (Taylor et al., 2013). Recharge üzerine yapılan modellemelerde, su bilançosunun yanı sıra zamansal eşitsizlikler ve taşkın rejimleri de göz önünde bulundurulmaktadır.

Öte yandan, artan buharlaşma ve kuraklık koşulları, yalnızca beslenme sürecini değil, aynı zamanda yeraltı suyunun kalitesini de tehdit etmektedir. Konsantrasyon artışı, özellikle nitrat, ağır metaller ve tuzluluk gibi parametrelerde gözlemlenmekte; bu da ekosistem sağlığı ve içme suyu güvenliği açısından kritik sorunlara yol açmaktadır (Asoka et al., 2017).

Bu bölümdeki bulgular, iklim değişikliğine duyarlı bir yeraltı suyu yönetimi oluşturmak için bölgesel düzeyde izleme, modelleme ve senaryo analizlerinin entegre edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Jiménez-Martínez et al., 2022; Green et al., 2011).

3. Yeraltı Suyu Hassasiyetinin Değerlendirilmesinde Kullanılan Yöntemler

Yeraltı suyu sistemlerinin iklim değişikliği karşısında ne derece savunmasız olduğunu belirlemek için geliştirilen hassasiyet değerlendirme yöntemleri, bilimsel ve yönetsel karar süreçlerinde önemli bir yer tutmaktadır. Bu yöntemler

genellikle iki ana gruba ayrılmaktadır: indeks (skor) tabanlı yöntemler ve sayısal (modelleme) tabanlı yaklaşımlar (Davamani et al., 2024).

3.1 İndeks Tabanlı Yöntemler

İndeks tabanlı yöntemler, yeraltı suyunun korunmaya ihtiyaç duyduğu alanları belirlemek için hidrojeolojik parametrelerin skorlama sistemine dayalı analizine dayanır. Bunlar arasında en yaygın kullanılanlar şunlardır:

- **DRASTIC:** Derinlik, Yenilenme, Akifer Ortamı, Toprak Özelliği, Topografya, Etki derecesi ve Hidrolik iletkenlik olmak üzere yedi parametreye dayalı bir modeldir (Aller et al., 1987).
- **GOD:** Groundwater occurrence, Overall lithology ve Depth parametrelerini içeren daha basit bir değerlendirme sistemidir.
- **SINTACS:** DRASTIC'in İtalya koşullarına uyarlanmış versiyonudur ve yedi parametrede farklı ağırlık katsayıları uygulanır.
- **AVI (Aquifer Vulnerability Index):** Özellikle nitrat gibi yaygın kirleticilerin risk değerlendirmesi için tercih edilir.

Bu yöntemler CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) ile birlikte kullanıldığında, alansal hassasiyet haritalarının oluşturulmasına olanak tanır ve sürdürülebilir yeraltı suyu yönetimi için temel veri sağlar (Babiker et al., 2005).

3.2 Sayısal ve Model Tabanlı Yöntemler

Sayısal yöntemler, yeraltı suyu akışı ve kirletici taşınımı gibi süreçleri matematiksel olarak simüle eden fizik-temelli modellerdir. Bunlar arasında:

- **MODFLOW:** ABD Jeoloji Araştırmaları Kurumu (USGS) tarafından geliştirilen, doymuş ortamda yeraltı suyu akımını modelleyen en yaygın yazılımdır (Scibek & Allen, 2006).
- **HYDRUS:** Doymamış bölgedeki akım ve çözücü taşınımı modelleyen bir yazılımdır; özellikle tarımsal alanlarda gübre kaynaklı kirlilik analizinde kullanılır.
- **SWAT:** Havza bazında yüzey akışı ve su kalitesi modellemelerinde kullanılır.

Son yıllarda bu modellerin CBS, çok kriterli karar verme (MCDM), AHP (Analitik Hiyerarşi Süreci) ve makine öğrenimi teknikleriyle entegre edildiği hibrit sistemlerin kullanımı artmıştır (Kumar et al., 2024).

Bu değerlendirme sistemleri, sadece risk altındaki bölgelerin tespitinde değil, aynı zamanda farklı senaryolara göre su yönetimi stratejilerinin test edilmesinde de etkin rol oynamaktadır.

4. CBS ve Modelleme Tabanlı Yöntemlerin Kullanımı

Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), hidrojeolojik parametrelerin mekânsal analizine olanak sağlayan güçlü bir araç olup, yeraltı suyu hassasiyetinin değerlendirilmesinde geniş bir uygulama alanına sahiptir. CBS tabanlı uygulamalarda, hassasiyet analizinde kullanılan parametreler (örneğin: toprak tipi, eğim, akifer litolojisi, derinlik, yağış gibi) raster veya vektör formatında analiz edilerek hassasiyet indeksleri oluşturulur (Babiker et al., 2005).

CBS'nin gücü, çok katmanlı verileri birleştirme kapasitesinden gelir. DRASTIC, GOD, SINTACS gibi indeks temelli yöntemler CBS ile entegre edildiğinde, alansal olarak farklı risk düzeylerine sahip bölgeler tanımlanabilir ve bu alanlara özel koruma stratejileri geliştirilebilir (Davamani et al., 2024).

Öte yandan, sayısal modellerin CBS ile entegre edilmesi son yıllarda yaygınlaşmıştır. Örneğin MODFLOW ile yeraltı suyu akımı modellenirken, model girdi parametreleri (hidrolik iletkenlik, sınır koşulları, yükleme koşulları) CBS üzerinden sağlanabilmekte ve çıktı haritaları mekânsal olarak değerlendirilebilmektedir (Scibek & Allen, 2006).

Ayrıca çok kriterli karar verme (MCDM) yaklaşımlarıyla birlikte CBS kullanımı, farklı hassasiyet faktörlerinin ağırlıklandırılarak değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) gibi tekniklerle CBS ortamında hassasiyet sınıflandırmaları yapılabilmekte ve bu sistemler özellikle sınırlı veri ortamlarında oldukça etkili sonuçlar vermektedir (Kumar et al., 2024).

Uzaktan algılama teknolojileri ile entegre edilen CBS sistemleri sayesinde, arazi örtüsü, sıcaklık, nem gibi parametrelerin zamansal değişimi de hassasiyet değerlendirmelerine dahil edilebilmektedir. Bu sayede yalnızca statik değil, dinamik ve senaryoya dayalı analizler mümkün hale gelmektedir (Taylor et al., 2013).

CBS ve modelleme temelli bu entegre yaklaşımlar, yeraltı suyu yönetimi açısından stratejik kararların alınmasında bilimsel altyapıyı güçlendirmekte; iklim değişikliğine karşı bölgesel ve ulusal düzeyde uyarlanabilir su politikalarının temelini oluşturmaktadır.

5. İklim Senaryoları ve Projeksiyonlara Dayalı Risk Analizleri

İklim senaryoları, iklim değişikliğinin gelecekteki etkilerini öngörebilmek adına kullanılan en önemli araçlardan biridir. Özellikle IPCC tarafından geliştirilen Temsili Konsantrasyon Yolları (Representative Concentration Pathways – RCP) ve daha yeni Sürdürülebilirlik Sosyoekonomik Yolları (Shared Socioeconomic Pathways – SSP), su kaynakları üzerine olası etkilerin değerlendirilmesinde temel girdi olarak kullanılmaktadır (IPCC, 2014).

RCP 4.5 ve RCP 8.5 gibi senaryolar altında yapılan hidrolojik modellemeler, yeraltı suyu beslenme oranlarında ciddi azalmalar, su tablasında düşüş ve çekim oranlarında artış öngörmektedir (Döll et al., 2018). Örneğin, MODFLOW ve SWAT gibi modellerin bu senaryolarla entegre edilerek yürütüldüğü çalışmalarda, Avrupa, Hindistan ve Çin gibi farklı coğrafyalarda 2040–2070 yılları arasında %10–50 aralığında yenilenme düşüşü tespit edilmiştir (Portmann et al., 2013; Scibek & Allen, 2006).

Buna paralel olarak, aşırı hava olaylarının (kuraklık, taşkın) sıklığında yaşanan artış, hem niceliksel hem de niteliksel riskleri beraberinde getirmektedir. Özellikle taşkınlar sonucunda yüzey kirleticilerinin akifer sistemlerine taşınma riski artmakta; bu durum su kalitesinde bozulmaya ve içme suyu güvenliğinde tehditlere yol açmaktadır (Jiménez-Martínez et al., 2022).

RCP senaryolarına dayalı risk analizleri yalnızca fiziksel parametrelerle sınırlı kalmamakta; aynı zamanda sosyoekonomik gelişmeler, nüfus artışı, arazi kullanım değişimi gibi faktörlerle birlikte bütünleşik analizler yapılmaktadır. Bu yaklaşımlar sayesinde su yönetimi politikalarının esnekliği, uyum kapasitesi ve dayanıklılığı ölçülebilmektedir (Kundzewicz et al., 2008).

Örneğin, Hindistan’da yapılan bir çalışmada, monsun düzenindeki değişimle birlikte yeraltı suyunun beslenme dinamiklerinin dramatik biçimde etkilendiği ve bu değişimin 2050 sonrası dönemde tarımsal üretkenliği tehdit edebileceği öngörülmüştür (Asoka et al., 2017). Benzer şekilde, Neukum & Azzam (2009) tarafından yapılan bir Avrupa çalışmasında, farklı RCP senaryoları altında bazı bölgelerde tuzlu su girişi riskinin arttığı rapor edilmiştir.

Bu senaryolar doğrultusunda yapılan projeksiyonlar, yalnızca teknik değil, yönetsel karar alma süreçleri için de stratejik planlamaların temelini oluşturmaktadır. Bu nedenle, yeraltı suyu yönetimi senaryoya dayalı risk değerlendirmeleriyle güçlendirilmeli, iklim belirsizliğine karşı adaptif stratejilerle desteklenmelidir.

6. Uyum Stratejileri ve Politikalar

İklim değişikliğinin yeraltı suları üzerindeki etkilerini azaltmak ve sistemlerin dayanıklılığını artırmak için geliştirilen uyum stratejileri, teknik önlemlerle sınırlı kalmayıp yönetsel, hukuki ve toplumsal bileşenleri de içermelidir (Kundzewicz et al., 2008). Sürdürülebilir su yönetimi ancak çok katmanlı ve katılımcı yaklaşımlarla mümkün olabilir.

6.1 Entegre Su Kaynakları Yönetimi (IWRM) Yeraltı ve yüzey suyu kaynaklarının birlikte yönetimini hedefleyen IWRM yaklaşımları, kıt kaynakların rekabetçi kullanımını dengelemeyi amaçlamaktadır. Yerel ve

bölgesel planlama süreçlerinde iklim değişikliği senaryoları dikkate alınarak esnek tahsis planları geliştirilmelidir (GWP, 2000).

6.2 CBS Destekli Koruma ve İzleme Sistemleri Hassas alanların tanımlanmasında ve izlenmesinde CBS tabanlı sistemler önceliklendirme sağlar. Özellikle DRASTIC gibi indeks yöntemleriyle oluşturulan hassasiyet haritaları, yasa koyuculara ve uygulayıcılara mekânsal karar alma süreçlerinde rehberlik eder (Davamani et al., 2024).

6.3 Tarımda İyileştirme Stratejileri Tarım sektöründe su kullanımı optimize edilmeli, damlama sulama sistemleri, kapalı devre sulama, minimum toprak işleme ve gübre optimizasyonu gibi uygulamalar yaygınlaştırılmalıdır. Bu önlemler hem su tüketimini azaltmakta hem de kirletici yükün akiferlere ulaşmasını sınırlandırmaktadır (Jiménez-Martínez et al., 2022).

6.4 Yasal ve Kurumsal Düzenlemeler Yeraltı suyu tahsisinde ruhsatlandırma sistemlerinin şeffaflaştırılması, yasa dışı kuyuların tespiti ve kayıt altına alınması, cezai yaptırımların etkinleştirilmesi gerekmektedir. Aynı zamanda yerel su yönetim birimlerinin kapasitelerinin artırılması önem arz etmektedir (Kundzewicz et al., 2008).

6.5 Paydaş Katılımı ve Toplumsal Farkındalık Yerel halk, çiftçiler, sanayi temsilcileri ve sivil toplum kuruluşlarının sürece dahil edilmesi, uygulamaların başarısını artırır. Eğitim kampanyaları, su kullanım farkındalığını artıran projeler ve veri paylaşım sistemleri, bu kapsayıcı yapının temel taşlarını oluşturur (Green et al., 2011).

6.6 Senaryo Tabanlı Planlama ve Esneklik Belirsizliklerin yüksek olduğu iklim projeksiyonlarına karşı senaryo tabanlı planlama yaklaşımı geliştirilmelidir. Esnek stratejiler, ani değişimlere uyum sağlama kapasitesi yüksek sistemlerin kurulmasını destekler (Portmann et al., 2013).

Bu başlıklar altında geliştirilecek bütüncül stratejiler, yeraltı suyu yönetiminde dayanıklı ve sürdürülebilir sistemlerin oluşturulmasına katkı sağlayacaktır.

7. Sonuç ve Gelecek Öneriler

Bu çalışma, iklim değişikliğinin yeraltı suyu kaynakları üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde ele alarak, hassasiyet değerlendirme yöntemlerinin güncel durumunu ve bu yöntemlerin CBS ile entegrasyonunu literatür temelli bir bakışla ortaya koymuştur. Literatür incelendiğinde, indeks tabanlı yöntemlerin özellikle DRASTIC, SINTACS ve GOD modelleri aracılığıyla risk bölgelerinin belirlenmesinde etkili olduğu; ancak bu yaklaşımların dinamik iklim değişkenlerini içermeye sınırlı kaldığı anlaşılmaktadır (Aller et al., 1987; Davamani et al., 2024).

Buna karşılık, sayısal modelleme teknikleri (MODFLOW, HYDRUS, SWAT) ve CBS tabanlı analizler, daha yüksek çözünürlükte ve zamansal boyutu içeren tahminler yapmaya olanak sağlamaktadır. Bu modellerin çok kriterli karar destek sistemleri (MCDM, AHP) ve makine öğrenimi algoritmaları ile entegre edilmesi, özellikle sınırlı veri ortamlarında karar alma süreçlerini daha sağlam temellere oturtmaktadır (Kumar et al., 2024).

İklim senaryoları altında yapılan risk projeksiyonları, yeraltı suyu kaynaklarının gelecekte ciddi tehditlerle karşı karşıya kalacağını göstermektedir. Bu nedenle, bilimsel yöntemlerle desteklenen senaryo temelli planlamaların, karar vericilere rehberlik etmesi ve uygulayıcılar tarafından hayata geçirilmesi büyük önem arz etmektedir.

Gelecekteki çalışmalarda aşağıdaki başlıklara ağırlık verilmesi önerilmektedir:

- Hassasiyet değerlendirme yöntemlerinin zaman serili analizlerle güçlendirilmesi,
- Uyum stratejilerinin bölgesel iklim projeksiyonlarına göre esnekleştirilmesi,
- Yerel ölçekte paydaş katılımı ile geliştirilen yönetim planlarının uygulanması,
- Uzaktan algılama, IoT sensörleri ve yapay zekâ tabanlı sistemlerin yaygınlaştırılması.

Sonuç olarak, yeraltı sularının sürdürülebilir yönetimi için yalnızca teknik çözümler değil; aynı zamanda yönetim, hukuk, ekonomi ve toplum temelli bütüncül yaklaşımların bir arada uygulanması gerekmektedir. Bu bağlamda, çalışmada sunulan derleme ve öneriler, karar vericiler ve araştırmacılar için yol gösterici bir çerçeve sunmayı amaçlamaktadır.

Kaynakça

- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J. H., Petty, R. J., & Hackett, G. (1987). DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings (EPA/600/2-87/035). U.S. Environmental Protection Agency.
- Asoka, A., Gleeson, T., Wada, Y., & Mishra, V. (2017). Relative contribution of monsoon precipitation and pumping to changes in groundwater storage in India. *Nature Geoscience*, 10(2), 109–117. <https://doi.org/10.1038/ngeo2869>
- Babiker, I. S., Mohamed, M. A. A., Hiyama, T., & Kato, K. (2005). A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan. *Science of the Total Environment*, 345(1–3), 127–140. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.11.005>
- Davamani, A., Bhattacharya, T., Mukherjee, R., & Singh, N. K. (2024). A critical review of climate change impacts on groundwater resources. *Atmosphere*, 15(1), 122. <https://doi.org/10.3390/atmos15010122>
- Döll, P., Fiedler, K., & Zhang, J. (2018). Global-scale analysis of climate change impacts on water resources using the WaterGAP model. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 5(4), e1314. <https://doi.org/10.1002/wat2.1314>
- Ferguson, I. M., & Maxwell, R. M. (2012). Human impacts on terrestrial hydrology: Climate change versus pumping and land use change. *Environmental Research Letters*, 7(4), 044022. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044022>
- Green, T. R., Taniguchi, M., Kooi, H., Gurdak, J. J., Allen, D. M., Hiscock, K. M., ... & Treidel, H. (2011). Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. *Journal of Hydrology*, 405(3–4), 532–560. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.002>
- GWP (Global Water Partnership). (2000). Integrated Water Resources Management. TAC Background Papers No. 4. Stockholm, Sweden.
- IPCC. (2014). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Jiménez-Martínez, J., Candela, L., & Tamoh, K. (2022). Climate change impacts on recharge and groundwater quality. *Hydrogeology Journal*, 30(5), 1123–1138. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02439-0>
- Kumar, M., Rani, A., Choudhary, R., Singh, P., & Singh, A. K. (2024). Comparative assessment of aquifer vulnerability using DRASTIC and SINTACS models:

- A case study from India. *Atmosphere*, 15(1), 122.
<https://doi.org/10.3390/atmos15010122>
- Kundzewicz, Z. W., Mata, L. J., Arnell, N. W., Döll, P., Kabat, P., Jiménez, B., ... & Shiklomanov, I. (2008). The implications of projected climate change for freshwater resources and their management. *Hydrological Sciences Journal*, 53(1), 3–10. <https://doi.org/10.1623/hysj.53.1.3>
- Neukum, C., & Azzam, R. (2009). Assessing the impact of climate change on groundwater systems using model simulations and vulnerability mapping: A case study from Germany. *Hydrogeology Journal*, 17(2), 455–469.
<https://doi.org/10.1007/s10040-008-0386-9>
- Portmann, F. T., Siebert, S., Bauer, C., & Döll, P. (2013). Global data set of monthly growing areas of 26 irrigated crops. *Global Biogeochemical Cycles*, 24(1), GB1011. <https://doi.org/10.1029/2009GB003618>
- Scibek, J., & Allen, D. M. (2006). Modeled impacts of predicted climate change on recharge and groundwater levels. *Water Resources Research*, 42(11).
<https://doi.org/10.1029/2005WR004742>
- Soundala, S., & Saraphirom, P. (2022). Groundwater vulnerability assessment and management using MODFLOW and DRASTIC model integration in Laos. *Sustainable Water Resources Management*, 8(2), 36.
<https://doi.org/10.1007/s40899-022-00606-z>
- Taylor, R. G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., van Beek, R., Wada, Y., ... & Treidel, H. (2013). Ground water and climate change. *Nature Climate Change*, 3(4), 322–329. <https://doi.org/10.1038/nclimate1744>



BÖLÜM 4

Yenilenebilir Enerjide Rüzgârın Rolü: Potansiyel, Teknoloji ve Gelecekteki Yeri

Kadir Yılmaz¹ & Taner Dindar²

1. GİRİŞ

Enerji, günümüzde yalnızca ekonomik kalkınma için değil; aynı zamanda sosyal refah, teknolojik ilerleme, çevresel sürdürülebilirlik ve politik bağımsızlık açısından da en kritik stratejik unsurlardan biri olarak kabul edilmektedir. Sanayileşme ile birlikte artan enerji talebi, fosil yakıtların aşırı kullanımı ve buna bağlı olarak gelişen çevre sorunları, alternatif enerji kaynaklarının önemini ön plana çıkarmıştır.

Bu çalışmanın temel amacı, yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde en hızlı gelişen alanlardan biri olan rüzgâr enerjisini her yönüyle ele almak ve ayrıntılı bir inceleme yapmaktır. Rüzgârın fiziksel özelliklerinden başlayarak, rüzgâr enerjisinin tarihsel gelişim süreci, rüzgâr santrallerinin teknik yapısı ve çalışma prensipleri, dünya ve Türkiye’deki mevcut durum, ekonomik ve sosyal etkiler, faydalar ve dezavantajlar, son olarak da geleceğe yönelik projeksiyonlar akademik bir bakış açısıyla tartışılacaktır.

Yenilenebilir enerji kaynakları; güneş, rüzgâr, hidroelektrik, biyokütle ve jeotermal enerji olarak sınıflandırılmaktadır. Bu kaynaklar arasında rüzgâr enerjisi, belirli avantajları sayesinde ön plana çıkmaktadır; Sınırsız bir kaynaktır ve sürekli enerji elde edilebilir. Karbon salımı düşüktür. Maliyet avantajı sağlar. Teknolojik gelişmelerle birlikte rüzgâr enerjisinin üretim maliyetleri düşmektedir. Küresel çapta hızla yayılmaktadır. 2000’li yılların başında yalnızca birkaç GW olan kurulu güç, 2023 itibarıyla 900 GW’ı aşmıştır [1]. Günümüzde rüzgâr enerjisi, küresel ölçekte ve Türkiye özelinde enerji politikalarının merkezinde yer alan stratejik bir kaynaktır. Yenilenebilir enerjinin dünyada ve Türkiye’deki istihdam üzerindeki etkisini inceleyen araştırmalar, ülkemizde hidrolik enerjiden sonra en fazla istihdam sağlayan kaynakların rüzgâr ve güneş enerjisi olduğunu ortaya koymuştur [2]. Yenilenebilir enerji kaynaklarının

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kocaeli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye, kayel@kocaeli.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-0819-3420

² Öğr. Gör. Dr, Ankara Üniversitesi, Nallıhan Meslek Yüksek Okulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Ankara, Türkiye, tdindar@ankara.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-4112-2114

Türkiye üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla yapılan ampirik çalışmada, eşbütünleşme analizi sonuçlarına göre bu kaynaklardan elde edilen enerjinin uzun vadede kentleşme, enerji tüketimi ve kişi başına düşen milli gelirle ilişkili olduğu belirlenmiştir [3]. Fosil yakıtlardan yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişin, iklim değişikliğini ve buna bağlı olumsuz etkileri azaltmaya nasıl katkı sağlayacağını incelemiştirler [4]. Edremit Körfezi'nde kurulması planlanan 50–90 MW kapasiteli açık deniz rüzgâr enerjisi santralinin fizibilite çalışmasını, kapsamlı simülasyonlar ve analizler yaparak gerçekleştirmişlerdir [5].

1. RÜZGÂRIN OLUŞUMU VE ATMOSFER DİNAMİKLERİ

Rüzgârın temel kaynağı güneş enerjisidir. Güneş'ten dünyaya gelen ışınlar, farklı yüzeyleri farklı oranlarda ısıtır. Örneğin kara parçaları denizlere göre daha çabuk ısınır ve soğur. Bu durum, aynı bölgede bile sıcaklık farklılıklarının oluşmasına yol açar. Isınma farklılıkları, atmosferde basınç farklarının oluşmasına yol açar. Yüksek sıcaklıkla birlikte hava yükselir ve alçak basınç alanı oluşturur; düşük sıcaklıkta ise hava yoğunlaşır ve yüksek basınç alanı meydana gelir. Yüksek basınçtan alçak basınca doğru hareket eden hava akımı ise rüzgârı oluşturur [6]. Rüzgârın hızı ve yönü yalnızca küresel sistemlerle belirlenmez; aynı zamanda yer şekilleri ve yüzey özellikleri de önemli rol oynar. Dağlar Rüzgâr yönünü değiştirir, hızını artırabilir veya azaltabilir. Vadiler rüzgârın kanallı olmasına yol açar. Ormanlar, Rüzgârı yavaşlatır, sürtünmeyi artırır. Şehirler, yüksek binalar rüzgârın yönünü değiştirir ve türbülans yaratır.

Bu nedenle rüzgâr santrallerinin kurulacağı bölgelerde yüzey pürüzlülüğü analizleri yapılır. Rüzgâr ölçüm direkleriyle en az 1 yıl boyunca veri toplanır.

2. RÜZGÂR ENERJİSİ

2.1. Hesaplanması ve temelleri

Rüzgâr enerjisi, atmosferdeki hava hareketlerinin taşıdığı kinetik enerjinin mekanik ve ardından elektrik enerjisine dönüştürülmesiyle elde edilen enerji türüdür. Rüzgâr türbinleri, hareket eden hava kütesinin kanatlar üzerinde oluşturduğu kaldırma kuvvetini kullanır. Bu kuvvet rotora iletilerek dönme hareketine döndürür ve jeneratör sayesinde elektrik enerjisi üretilir. Rüzgârdan elektrik enerjisi elde etmek için kullanılan rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemi (REDS)'ler, rüzgârdaki kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye daha sonra da elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. İlk zamanlarda REDS'lerde sabit hızlı türbinler kullanılmaktaydı. Ancak değişen rüzgâr koşullarına göre düşük verimlilikle çalışmaları, anlık rüzgâra göre hızı ayarlanabilen daha yüksek verimli, değişken hızlı türbinlerin kullanımını arttırmıştır. Enerji üretiminde

kullanılan generatörler açısından bakıldığında ise son yıllarda dışardan uyarıtma ihtiyaç duymadan çalışan güçlü mekanik karakteristiğe sahip kalıcı mıknatıslı senkron generatör (KMSG)'ler ön plana çıkmaktadır. Doğrudan türbin yapısıyla bağlanabilecek şekilde tasarlanabilmeleri, giderek düşen maliyetleri rüzgâr enerjisinde kullanımlarını yaygınlaştırmıştır[7-8].

Anlık rüzgâr hızına göre türbin tarafından elde edilen mekanik güç, Denklem 1'deki gibi ifade edilir.

$$P_{\text{mekanik}} = 1/2 \times \rho \times C_p \times A \times V_R^3 \quad (1)$$

Denklem 1'de, ρ hava yoğunlunu (kg/m³), A rüzgâr türbininin süpürme alanını (m²), v is rüzgâr hızını (m/s) ve C_p kullanılan rüzgâr türbininin verimini ifade etmektedir.

Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde A rüzgâr türbinin süpürme alanı ifadesi denklem (2) yardımıyla elde edilmektedir.

$$A = (\pi \cdot D^2) / 4 \quad (2)$$

Bu ifade de D rotor çapının m cinsinden ifadesidir. Dolayısı ile süpürme alanın, rotor çapının karesiyle orantılı olarak artmaktadır. Rotor çapı mekanik tasarımın bir sonucu olduğu için güç hesabında önemli bir parametredir.

C_p rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinde türbindeki mekanik enerjinin rüzgârın mevcut enerjisine oranı olarak da tanımlanabileceği gibi rüzgârdan ne kadar oranda faydalanılabildiğini gösteren güç (verimlilik) katsayısıdır [9-10].

Güç katsayısı farklı değişkenlere göre denklem 3'de gösterilmiştir.

$$1/\lambda_i = 1 / (\lambda + 0.08\beta) - (0.035 / (\beta^3 + 1)) \quad (3)$$

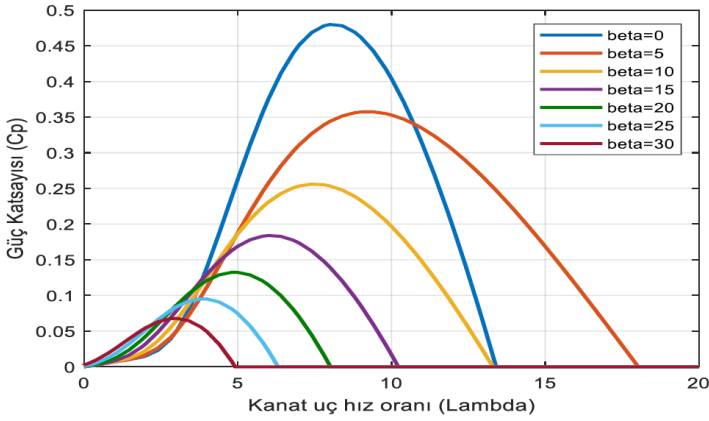
β Yüksek hızlarda türbinin zarar görmesini engelleyecek şekilde devreye girebilen kanat açısı, λ ise kanat uç hız oranı (KHO) olarak tanımlanır. Bu oran matematiksel olarak Denklem 4'deki gibi ifade edilir.

$$KHO(\lambda) = (w_M \times R) / V_R \quad (4)$$

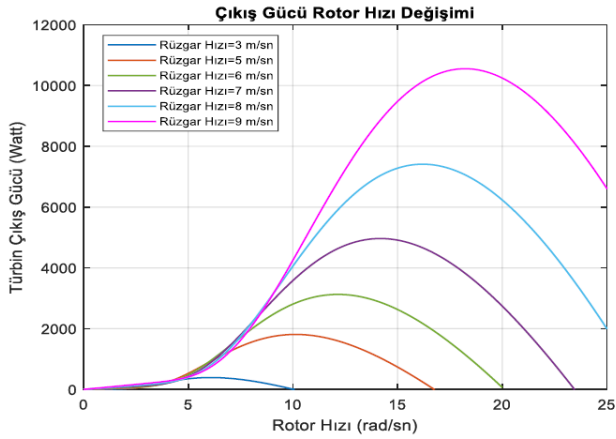
Burada R türbin kanat yarıçapı, w_M türbinin ve ona doğrudan bağlı generatörün rotor açısal hızı, V_R ise rüzgâr hızıdır. Güç katsayısı en uygun KHO ve kanat açısı değerlerinde maksimum 0.5926 değerini almaktadır. Bu maksimum değer aynı zamanda betz limiti olarak da adlandırılmaktadır [8].

Bu değer teorik olarak rüzgârın yaklaşık %60'ından yararlanılabildiğini gösterir. Ancak pratikte kayıplardan dolayı anlık rüzgârdan maksimum %40 ile

%50 arasında faydalanılırken güç katsayısı da en ideal 0.4 ile 0.5 arasında değerlerde tutulabilir [10-11]. Güç katsayısı ve KHO arasındaki bağıntı türbindeki dönüşüm verimliliği adına en önemli kriterdir. Değişen kanat açısı değerlerine göre güç katsayısının KHO'ya göre değişimi Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Güç katsayısı KHO değişimi [10]



Şekil 2. Türbin çıkış gücünün rotor hızına göre değişimi [10]

2.2. Rüzgârın sağladığı enerji miktarı

Bir türbinin üretebileceği enerji, yalnızca rüzgâr hızına değil aynı zamanda kanat uzunluğuna da bağlıdır. 40 metre kanat uzunluğuna sahip bir türbinin süpürdüğü alan yaklaşık 5.000 m²'dir. Ortalama 10 m/s rüzgâr hızında bu türbin, teorik olarak yaklaşık 600 kW enerji üretebilir. Teorik olarak hesaplandığında kayıplar dahil edilmediğinde bu sonuçlar çıkmaktadır fakat kayıplar, türbin

verimliliği ve Betz Limiti nedeniyle daha düşük değerler elde edilir. rüzgâr türbinlerinin verimliliği üzerine bir sınır ortaya koymuştur. Buna göre hiçbir türbin, rüzgârın taşıdığı enerjinin %59,3'ünden fazlasını yakalayamaz. Bu sınır Betz Limiti olarak bilinir.

Modern türbinler pratikte %40–50 verimlilik oranına ulaşabilmektedir. Bu da teknolojinin sınırları zorladığını göstermektedir. Kanat aerodinamiği, dişli kutusu tasarımları ve jeneratör teknolojilerindeki gelişmeler bu oranı sürekli artırmaktadır.

3. RÜZGÂR ENERJİSİNİN KULLANIM ALANLARI

Rüzgâr enerjisi, yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Günümüzde ilerleyen teknoloji sayesinde farklı alanlarda karşımıza çıkmaktadır. Rüzgârın sahip olduğu kinetik enerji, modern türbinler yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürülerek bireysel ve endüstriyel ölçekte kullanılabilir. Rüzgâr enerjisi, yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Günümüzde ilerleyen teknoloji sayesinde farklı alanlarda karşımıza çıkmaktadır. Rüzgârın sahip olduğu kinetik enerji, modern türbinler yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürülerek bireysel ve endüstriyel ölçekte kullanılabilir.

3.1. Elektrik Üretimi alanında kullanımı

Rüzgâr enerjisinin en yaygın kullanım alanı elektrik üretimidir. Karada ve denizde kurulan rüzgâr santralleri sayesinde, temiz ve sürdürülebilir üretilen elektrik enerjisi şebekeye aktarılmaktadır. Küçük ölçekli rüzgâr türbinleri ise kırsal alanlarda evlerin, çiftliklerin veya küçük işletmelerin elektrik ihtiyacını karşılamak için tercih edilmektedir. Yenilenebilir enerji olduğundan karbon salınımı da önemli ölçüde azalmaktadır.

3.2. Ulaşım ve Geleneksel Kullanımlar

Rüzgâr enerjisi elektrik üretiminin haricinde, ulaşım da kullanılmaktadır. Geçmiş yıllarda yelkenli gemiler rüzgâr gücünden faydalanmış, günümüzde ise modern deniz taşımacılığında yakıt tüketimini azaltmak için rüzgâr destekli yelken teknolojileri kullanılmaktadır.

3.3. Su Pompalama ve Tarımsal Kullanımlar

Rüzgâr enerjisi, kırsal bölgelerde sulama sistemleri ve içme suyu temini için kullanılmaktadır. Elektrik enerjisinin transformatör merkezlerinde taşınması zor durumda olduğunda rüzgârla çalışan pompalar sayesinde elektrik altyapısına ihtiyaç duymadan suyun kuyulardan çekilmektedir. Bu şekilde olduğunda, tarım faaliyetlerinin daha verimli yürütülmesine katkı sağlar.

4. RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN ÇALIŞMA PRENSİBİ

Rüzgâr santralleri, basit görünen fakat ardında karmaşık mühendislik barındıran bir dönüşüm sürecine dayanır. Rüzgârın Kanatlara Çarpması

durumunda, türbin kanatlarının aerodinamik yüzeyine çarpar. Kanat profili uçak kanadına benzer şekilde tasarlandığı için hava akımı üzerinde bir basınç farkı oluşur. Kanadın üst yüzeyinde düşük basınç, alt yüzeyinde yüksek basınç meydana gelir. Bu fark “kaldırma kuvveti” doğurur ve kanatlar dönmeye başlar. Rotorun dönmesinin sağlanması, kanatların dönme hareketi, rotora iletilir. Rotor, kanatlarla birlikte dev bir pervane gibi çalışır. Dişli Kutusuna geçince rotorun dönme hızı genellikle düşük seviyededir (10–30 devir/dakika). Jeneratörün çalışabilmesi için bu hızın binlerce devire çıkması gerekir. Dişli kutusu bu dönüş hızını artırarak jeneratöre aktarır. Jeneratör devreye girer, yükseltile mekanik enerji jeneratörde elektromanyetik indüksiyon prensibiyle elektrik enerjisine dönüştürülür. Son olarak da elektrik aktarımı sağlanır, türbinin içinde üretilen elektrik, kablolar aracılığıyla trafoya gönderilir. Burada gerilim yükseltilir ve ulusal şebekeye aktarılmaya hazır hale gelir.

5. RÜZGÂR ENERJİSİ İLE ÖRNEK BİR HESAPLAMA

Bir rüzgâr türbininin elektrik üretimi için havanın yoğunluğu, kanatların süpürdüğü alan, rüzgâr hızı ve türbinin verimine bağlıdır. Kanat çapı 4 metre olan, yatay eksenli bir rüzgâr türbini üzerinde çalışırsak, kanatların yarıçapı 2 metre olacağı için, havada süpürdükleri dairesel alan yaklaşık 12,5 metrekare olacaktır. Rüzgâr hızının ortalama 6 metre/saniye olduğunu kabul edelim. Yatay eksenli türbinler teorik olarak en fazla yüzde 59 verimle çalıştığı, küçük ölçekli türbinlerde bu oran daha düşük olduğu da bilinmektedir. Çalışmamızda verimi 40 verimi kabul edersek, havanın yoğunluğunu da standart değer olan 1,2 kilogram/metreküp olarak da alırsak eğer 650 Watt güç üretebilir. Eğer rüzgâr biraz daha düşük, yani 5 metre/saniye olsaydı, güç yaklaşık 370 Watt’a düşerdi.

Bu örnek aslında rüzgâr hızındaki küçük değişiklikler, enerji üretimini katlayarak artırır. Hız iki katına çıktığında, üretilen enerji neredeyse on katına çıkar. İşte bu nedenle rüzgâr türbini almadan önce, kurulacak bölgedeki ortalama rüzgâr hızının doğru ölçülmesi son derece kritiktir.

6. SONUÇ

Rüzgâr enerjisi, doğanın bize sunduğu temiz ve sürdürülebilir enerji kaynaklarından biridir. Amaç sadece rüzgâr türbinini kurmak değil, doğru yerde, doğru ölçüm ve analizlerle karar vermektir. Çünkü rüzgârın hızı ve sürekliliği, elde edilecek elektrik üretimini doğrudan belirler.

Yapılan örnek hesaplamalarda da görüldüğü gibi, rüzgâr hızındaki küçük değişiklikler bile türbinin üreteceği gücü değiştirmektedir. Rüzgârdan elektrik

enerjisi üretilirken bölgenin ortalama rüzgâr hızının ölçülmesi, türbin seçiminin kanat yapısı ve süpürme alanına göre yapılması önemlidir.

Türkiye'nin sahip olduğu coğrafi çeşitlilik, rüzgâr enerjisi potansiyelini artırmaktadır. Sonuç olarak rüzgâr enerjisi, doğru koşullar sağlandığında temiz enerji kaynağıdır. Önümüzdeki yıllarda fosil yakıtların daha da azalacağı temiz enerji çözümleri içinde, rüzgârın stratejik önemi giderek artacağı tahmin edilmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] Özbektaş, S., Şenel, M. C., & Sungur, B. (2023). Dünyada Ve Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Durumu ve Kurulum Maliyetleri. *Mühendis ve Makina*, 64(711), 317-351.
- [2] Güllü, M., ve Kartal, Z. (2021). Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının İstihdam Etkisi. *Sakarya İktisat Dergisi*, 10(1), 36-65.
- [3] Ağır, H., Özbek, S., ve Türkmen, S. (2020). Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Belirleyicileri: Ampirik Bir Tahmin. *Uluslararası Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 6(4), 39-48.
- [4] Jaiswal, K. K., Chowdhury, C. R., Yadav, D., Verma, R., Dutta, S., Jaiswal, K. S., ve Karuppasamy, K. S. K. (2022). Renewable and sustainable clean energy development and impact on social, economic, and environmental health. *Energy Nexus*, 7, 100118.
- [5] Özbek, M., ve Tunç, K. (2021). Feasibility of Offshore Wind Energy in Turkey; A Case Study for Gulf of Edremit at the Aegean Sea. *Gazi University Journal of Science*, 34(2), 423-437.
- [6] Karaoğlu, M. (2018). Rüzgâr Ve Rüzgâr Olayları. *Journal of Agriculture*, 1(2), 39-48.
- [7] Yin, M., Li, G., Zhou, M., & Zhao, C. Modeling of the wind turbine with a permanent magnet synchronous generator for integration. In 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting; June 2007, pp. 1-6.
- [8] Ackermann T. *Wind Power in Power Systems*, United Kingdom, John Wiley & Sons, Ltd, 2005.
- [9] Percin H.B., Caliskan A. (2020). Modeling And Analysis Of Pitch Angle Control On Variable Speed Wind Turbines, In 2020 International Engineering and Natural Sciences Conference (IENSC), 5-6 November 2020, Diyarbakır, Turkey, pp. 131-140.
- [10] Bianchi, F. D., De Battista, H., Mantz, R. J. *Wind turbine control systems: principles, modelling and gain scheduling design*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [11] Soetedjo, A., Lomi, A., & Mulayanto, W. P. Modeling of wind energy system with MPPT control. In *Proceedings of the 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics*; July 2011; pp. 1-6.



BÖLÜM 5

Endüstri 5.0 Uygulama Stratejilerinin Önceliklendirilmesi: Bulanık TOPSIS Tabanlı Bir Yaklaşım

Kübra Tümay Ateş¹

1.Giriş

Sanayi devrimleri, insanlık tarihindeki ekonomik, teknolojik ve toplumsal dönüşümlerin en önemli itici gücü olmuştur. Birinci sanayi devrimi (18. yüzyıl sonları), buhar gücü ve mekanik üretim sistemlerini öne çıkarırken; ikinci sanayi devrimi elektrik, seri üretim ve iş bölümü ile üretkenliği artırmıştır. Üçüncü sanayi devrimi ise 20. yüzyılın son çeyreğinde otomasyon, elektronik ve bilgisayar teknolojilerinin üretim süreçlerine girmesiyle şekillenmiştir. Bu evrimsel süreç, günümüzde “Endüstri 4.0” kavramı ile zirveye ulaşmış; siber-fiziksel sistemler, nesnelerin interneti (IoT), büyük veri analitiği, yapay zekâ ve akıllı üretim teknolojileri üretim dünyasını kökten değiştirmiştir (Kagermann et vd., 2013; Xu vd. 2021).

Bununla birlikte, Endüstri 4.0 yaklaşımı yoğun biçimde teknoloji odaklı olması ve insan faktörünü ikinci plana atması nedeniyle eleştirilmiştir. Çalışanların iş güvenliği, yaratıcılığı, refahı ve toplumsal fayda boyutları çoğunlukla göz ardı edilmiş; dolayısıyla yeni bir paradigma ihtiyacı doğmuştur. Bu bağlamda ortaya çıkan Endüstri 5.0, yalnızca üretim verimliliğine odaklanmayan; aynı zamanda insanı merkeze alan, sürdürülebilirlik ve etik değerleri üretim süreçlerinin ayrılmaz bir parçası haline getiren bir sanayi vizyonu olarak tanımlanmaktadır (Nahavandi, 2019; Demirkan ve Spohrer, 2021).

Endüstri 5.0, gelişmiş otomasyon ve robotik teknolojilerle insan yaratıcılığını birleştirmekte; “insan-cobot” iş birliğini ön plana çıkararak çalışanların üretim süreçlerinde aktif rol üstlenmesini sağlamaktadır. Aynı zamanda döngüsel ekonomi, karbon ayak izinin azaltılması, kaynak verimliliği ve sosyal sorumluluk gibi sürdürülebilirlik boyutlarını da içermektedir (Breque vd. 2021). Dolayısıyla bu yeni yaklaşım, yalnızca teknolojik gelişmelerin ötesinde, toplum, çevre ve birey odaklı bir sanayi dönüşümünü ifade etmektedir.

Bu bağlamda, Endüstri 5.0’ın hayata geçirilmesi için işletmelerin ve politika yapıcıların izlemesi gereken çeşitli uygulama stratejileri bulunmaktadır. Ancak

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Çukurova Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, Sarıçam, 01330, Adana, Türkiye, ORCID: 0000-0002-3337-7969

bu stratejilerin önceliklendirilmesi, çok sayıda kriterin (teknolojik, insani, ekonomik, çevresel vb.) aynı anda dikkate alınmasını gerektiren karmaşık bir karar verme problemidir. Üstelik uzman değerlendirmeleri belirsizlik içerdiğinden klasik yöntemler yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle bulanık mantık tabanlı çok kriterli karar verme yöntemleri (ÇKKV) önem kazanmıştır. Bu çalışmada, Endüstri 5.0 uygulama stratejilerinin önceliklendirilmesi için Bulanık TOPSIS yöntemi tercih edilmiştir.

Son yıllarda Endüstri 5.0 üzerine yapılan akademik çalışmalar, bu yaklaşımın yalnızca teknolojik boyutlarıyla değil, aynı zamanda sosyal ve sürdürülebilirlik perspektifleriyle de ele alınması gerektiğini göstermektedir. Endüstri 5.0'ın, Endüstri 4.0'ın teknik altyapısını koruyarak insanı ve toplumu merkeze alan yeni bir vizyon sunduğu konusunda literatürde güçlü bir uzlaşa bulunmaktadır.

Nahavandi (2019), Endüstri 5.0'ın en temel özelliğini insanı üretim süreçlerinin merkezine yerleştirmesi olarak tanımlamaktadır. Çalışmada, cobotlar ve yapay zekâ ile iş birliği içinde çalışan insan faktörünün yalnızca verimlilik değil, aynı zamanda yaratıcılık ve yenilikçilik açısından da değer kattığı vurgulanmıştır. Bu bağlamda, insan-cobot iş birliği Endüstri 5.0'ın ayırt edici yönlerinden biri olarak öne çıkmaktadır.

Avrupa Komisyonu adına Breque vd.(2021) tarafından hazırlanan rapor, Endüstri 5.0'ın yalnızca ekonomik büyümeyi hedeflemediğini, aynı zamanda sürdürülebilirlik, iklim değişikliğiyle mücadele ve kaynak verimliliğini de öncelediğini ortaya koymaktadır. Bu yönüyle Endüstri 5.0, döngüsel ekonomi ilkeleriyle uyumlu bir biçimde toplumsal faydayı da gözetmektedir.

Teknolojik entegrasyon açısından Xu vd.(2021), Endüstri 4.0 ve 5.0 arasındaki ilişkiyi incelemiş ve 5.0'ın, 4.0'ın dijital temelleri üzerine inşa edildiğini belirtmiştir. Çalışmaya göre Endüstri 5.0, teknolojiyi reddetmek yerine, ona insani ve etik bir boyut ekleyerek üretim paradigmasını daha kapsayıcı hale getirmektedir.

Öte yandan, Endüstri 5.0 stratejilerinin önceliklendirilmesi konusunda çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemlerinin önemi de literatürde sıkça vurgulanmaktadır. Zavadskas vd. (2014), MCDM yöntemlerinin karar vericilere karmaşık problemleri çözmede sistematik bir çerçeve sunduğunu ortaya koymuştur. Büyüközkan ve Göçer (2018) ise özellikle belirsizlik içeren karar ortamlarında bulanık mantık tabanlı yöntemlerin güvenilir ve esnek sonuçlar sağladığını göstermiştir. Aynı zamanda; Pacheco (2024), Endüstri 5.0'ın insan-merkezli yapısının getirdiği gerilimleri incelemiş ve işletmelerin bu yeni paradigmaya uyum sürecinde karşılaştıkları zorlukları ortaya koymuştur. Bucci vd. (2024), insan dijital ikizleri (Human Digital Twins) kavramını öne çıkararak Endüstri 5.0'ın iş gücü yönetiminde yarattığı potansiyeli değerlendirmiştir. Tran

vd. (2024), Fuzzy AHP-TOPSIS entegrasyonunu kullanarak çok kriterli karar verme problemlerinde Endüstri 5.0 uygulamalarının daha sistematik analiz edilebileceğini göstermiştir. Barros vd. (2024), iş güvenliği ve cobot-insan etkileşimi bağlamında düşük maliyetli termal görüntüleme sensörlerinin Endüstri 5.0'daki rolünü incelemiştir. Fazlollahtabar vd. (2025), Endüstri 5.0 paradigma dönüşümünün işletmeler tarafından benimsenme sürecini ele almış ve dönüşümün başarı faktörlerini ortaya koymuştur.

Bu literatür ışığında, Endüstri 5.0 uygulama stratejilerinin yalnızca teknolojik uygunluk değil; aynı zamanda insan odaklılık, sürdürülebilirlik ve toplumsal fayda kriterleriyle değerlendirilmesi gerektiği açıktır. Bu nedenle, bulanık mantık tabanlı ÇKKV yöntemleri özellikle Bulanık TOPSIS stratejilerin önceliklendirilmesi için uygun bir yöntem olarak öne çıkmaktadır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Bulanık TOPSIS Yöntemi

Genel Çerçeve

TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) yöntemi, alternatiflerin **pozitif ideal çözüme** (en iyi değerlere) en yakın, **negatif ideal çözüme** (en kötü değerlere) ise en uzak olacak şekilde sıralandığı çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemidir. Ancak karar ortamlarında uzman görüşleri çoğunlukla belirsizlik ve dilsel değerlendirmeler içerdiğinden, klasik TOPSIS'in bulanık mantıkla genişletilmiş versiyonu olan **Bulanık TOPSIS** tercih edilmektedir.

Temel Kavramlar

Bulanık TOPSIS'te uzman değerlendirmeleri **üçgensel bulanık sayılar (Triangular Fuzzy Numbers)** ile ifade edilir. Üçgensel bulanık sayılar şu şekilde tanımlanır:

$$\tilde{A}=(l,m,u)$$

Burada:

- l : alt sınır (en düşük değer),
- m : en olası değer,
- u : üst sınır (en yüksek değer).

Üçgensel üyelik fonksiyonu:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0, & x < l \\ \frac{x-l}{m-l}, & l \leq x \leq m \\ \frac{u-x}{u-m}, & m \leq x \leq u \\ 0, & x > u \end{cases} \quad (1)$$

2.2. Bulanık TOPSIS Adımları

Adım 1. Bulanık Karar Matrisinin Oluşturulması

Karar matrisi $X' = [x_{ij}]$ aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$X' = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Burada x_{ij} i-inci alternatifin j-inci kritere göre bulanık değerlendirmesini gösterir.

Adım 2. Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi

Kriter ağırlıkları da üçgensel bulanık sayılar olarak ifade edilir:

$$\tilde{W} = (w_1, w_2, \dots, w_n) \quad (3)$$

Normalize edilmesi için:

$$\hat{w}_j = \frac{\tilde{w}_j}{\sum_{j=1}^n \tilde{w}_j} \quad (4)$$

Adım 3. Normalize Edilmiş Bulanık Karar Matrisi

Her bir değer fayda ya da maliyet türüne göre normalize edilir:

- Fayda kriteri için:

$$\hat{r}_{ij} = \left(\frac{l_{ij}}{u_{j+}}, \frac{m_{ij}}{m_{j+}}, \frac{u_{ij}}{l_{j+}} \right) \quad (5)$$

- Maliyet kriteri için:

$$\hat{r}_{ij} = \left(\frac{l_{j-}}{u_j}, \frac{m_{j-}}{m_{ij+}}, \frac{u_{j-}}{l_{ij}} \right) \quad (6)$$

Adım 4. Ağırlıklandırılmış Normalize Matris

Normalize değerler, kriter ağırlıkları ile çarpılır:

$$\tilde{v}_{ij} = r_{ij} \otimes w_j \quad (7)$$

Adım 5. Pozitif ve Negatif İdeal Çözümlerin Belirlenmesi

Pozitif İdeal Çözüm:

$$A^+ = \{ \tilde{v}_{1+}, \tilde{v}_{2+}, \dots, \tilde{v}_{n+} \}, \quad \tilde{v}_{j+} = \max \tilde{v}_{ij} \quad (8)$$

Negatif İdeal Çözüm:

$$A^- = \{ \tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \dots, \tilde{v}_n^- \}, \quad \tilde{v}_j^- = \min \tilde{v}_{ij} \quad (9)$$

Adım 6. Uzaklıkların Hesaplanması

Her alternatifin pozitif ideal çözümü ve negatif ideal çözüme uzaklığı bulanık Euclidean mesafe ile hesaplanır:

$$d_i^+ = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+) \quad (10)$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-) \quad (11)$$

Üçgensel bulanık sayılar arasındaki mesafe:

$$d(\tilde{A}, \tilde{B}) = \sqrt{\frac{1}{3} [(l_A - l_B)^2 + (m - m_B)^2 + (u_A - u_B)^2]} \quad (12)$$

Adım 7. Göreli Yakınlık Değerlerinin Hesaplanması

Son olarak, her alternatif için göreli yakınlık (C_i) değeri hesaplanır:

$$C_i = (d_i^-) / (d_i^+ + (d_i^-)) \quad 0 \leq C_i \leq 1 \quad (13)$$

C_i değeri 1'e ne kadar yakınsa, alternatif o kadar tercih edilir.

3. Çalışmanın Uygulanması ve Bulgular

3.1. Kriterlerin Belirlenmesi

Bu çalışmada Endüstri 5.0 uygulama stratejilerinin önceliklendirilmesi amacıyla dört ana kriter belirlenmiştir (Tablo 1). **Teknolojik Faktörler (C_1)**, yapay zekâ, cobot entegrasyonu, nesnelerin interneti (IoT) ve veri güvenliği gibi dijital dönüşüm unsurlarını kapsamaktadır. **İnsani Faktörler (C_2)**, çalışan memnuniyeti, yaratıcılık, iş güvenliği ve yetkinlik geliştirme gibi insan merkezli unsurları ifade etmekte olup, Endüstri 5.0'ın en belirgin yönünü oluşturmaktadır. **Sürdürülebilirlik (C_3)**, karbon ayak izinin azaltılması, döngüsel ekonomi uygulamaları ve kaynak verimliliği gibi çevresel boyutları içermektedir. **Ekonomik Faktörler (C_4)** ise yatırım maliyetleri, operasyonel verimlilik ve müşteri memnuniyeti gibi işletmelerin rekabet gücünü doğrudan etkileyen unsurları kapsamaktadır. Bu kriterler, literatürde Endüstri 5.0'ın temel boyutları olarak öne çıkan çalışmalardan (Breque, De Nul, ve Petridis, 2021; Nahavandi, 2019; Xu, Lu, Vogel-Heuser, ve Wang, 2021) yararlanılarak oluşturulmuş ve bu çalışmanın metodolojik çerçevesine uyarlanmıştır.

Tablo 1. Endüstri 5.0 stratejileri için kriterler

Kod	Kriter	Açıklama
C_1	Teknolojik Faktörler	Yapay zekâ, cobot entegrasyonu, IoT, veri güvenliği
C_2	İnsani Faktörler	Çalışan memnuniyeti, yaratıcılık, iş güvenliği, yetkinlik geliştirme
C_3	Sürdürülebilirlik	Karbon ayak izi azaltma, döngüsel ekonomi, kaynak verimliliği
C_4	Ekonomik Faktörler	Yatırım maliyeti, verimlilik, müşteri memnuniyeti

3.2. Sektörler -Alternatifler

Bu çalışmada Endüstri 5.0 uygulama stratejilerinin önceliklendirilmesi amacıyla dört temel sektör alternatif olarak belirlenmiştir (A_1 – A_4). **Otomotiv sektörü (A_1)**, cobot iş birliği ve kişiselleştirilmiş üretim uygulamalarıyla öne çıkmaktadır. Tesla, BMW ve Toyota gibi üreticilerin hem elektrikli araç

teknolojilerini hem de yapay zekâ destekli üretim hatlarını benimsemesi, bu sektörü Endüstri 5.0 için kritik bir alan haline getirmiştir. **Sağlık sektörü (A₂)**, insan-robot iş birliği ve yapay zekâ tabanlı teşhis sistemleri sayesinde doğrudan insan merkezli çözümler sunmaktadır. Örneğin, Da Vinci cerrahi robotları ve IBM Watson Health'in yapay zekâ tabanlı klinik karar destek sistemleri, Endüstri 5.0'ın sağlık alanındaki somut yansımalarıdır. **Gıda sektörü (A₃)** ise sürdürülebilirlik, yeşil üretim ve otomasyon odaklı uygulamalarla ön plana çıkmaktadır. Nestlé'nin karbon nötr hedefleri, Danone'un döngüsel ekonomi yaklaşımı ve gıda işleme süreçlerinde cobot kullanımı, bu sektörün Endüstri 5.0 vizyonu ile uyumunu göstermektedir. **Elektronik sektörü (A₄)** ise IoT tabanlı çözümler, yapay zekâ destekli üretim hatları ve kaynak verimliliği ile Endüstri 5.0'ın teknolojik boyutunu temsil etmektedir. Siemens'in dijital ikiz uygulamaları, Intel'in akıllı üretim süreçleri ve Samsung'un döngüsel ekonomi tabanlı üretim stratejileri bu yaklaşımın öncü örnekleridir. Dolayısıyla, seçilen bu dört sektör hem literatürde sıkça ele alınmaları hem de uygulamadaki güçlü örnekleriyle Endüstri 5.0 stratejilerinin bütüncül biçimde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır (Breque, De Nul, ve Petridis, 2021; Nahavandi, 2019; Xu, Lu, Vogel-Heuser, ve Wang, 2021).

Endüstri 5.0 uygulama stratejilerinin denenebileceği öne çıkan sektörler:

- **A₁: Otomotiv sektörü** (cobot iş birliği, kişiselleştirilmiş üretim, elektrikli araçlar)
- **A₂: Sağlık sektörü** (insan-robot iş birliği, yapay zekâ ile teşhis, kişiye özel tedavi)
- **A₃: Gıda sektörü** (yeşil üretim, otomasyon, sürdürülebilirlik)
- **A₄: Elektronik sektörü** (IoT, yapay zekâ destekli üretim hatları, döngüsel ekonomi uygulamaları)

Çalışmada uzman değerlendirmelerinin belirsizliğini modellemek için bulanık dilsel ölçek kullanılmıştır. Tablo 1'de görüldüğü üzere, karar vericilerin kullandığı “çok düşük”ten “çok yüksek”e kadar uzanan dilsel terimler, üçgensel bulanık sayılar ile temsil edilmiştir. Bu yaklaşım, öznel yargıların nicel forma dönüştürülmesine imkân tanımakta ve bulanık TOPSIS yönteminde kriter ağırlıkları ile alternatiflerin değerlendirilmesinde güvenilir bir temel sunmaktadır. Literatürde yaygın olarak kabul gören bu ölçek (Chen, 2000; Anbarkhan, 2023), karar vericilerin farklı algılarını hesaba katarak daha esnek ve gerçekçi sonuçlar elde edilmesine katkı sağlamaktadır.

Tablo 2. Bulanık dilsel terimler için üçgensel bulanık sayı ölçeği

Dilsel Terim	Bulanık Dilsel Değerler (l, m, u)
Çok Düşük (ÇD)	(1, 1, 3)
Düşük (D)	(1, 3, 5)
Orta (O)	(3, 5, 7)
Yüksek (Y)	(5, 7, 9)
Çok Yüksek (ÇY)	(7, 9, 9)

3.3. Endüstri 5.0 Uygulama Stratejilerinin Önceliklendirilmesi için Bulanık TOPSIS Hesaplama Adımları

Bu çalışmada kullanılan karar matrisi, Endüstri 5.0 uygulama stratejilerinin önceliklendirilmesine yönelik alternatiflerin değerlendirilmesinde temel veri setini oluşturmaktadır. Tablo 4’te görüldüğü üzere, dört kriter belirlenmiştir: teknoloji (C₁), insan (C₂), sürdürülebilirlik (C₃) ve ekonomi (C₄). Alternatifler ise otomotiv (A₁), sağlık (A₂), gıda (A₃) ve elektronik (A₄) sektörleridir. Her alternatif-kriter ikilisi, uzman görüşlerine dayanarak üçgen bulanık sayılar ile ifade edilmiştir. Bu değerler, ilgili kriter açısından alternatifin performansını alt, orta ve üst sınırlar şeklinde göstermektedir. Böylelikle karar matrisi, bulanık TOPSIS yönteminin ilk adımı olarak normalizasyon ve ağırlıklandırma işlemlerine temel teşkil etmektedir.

Tablo.3 Endüstri 5.0 uygulama stratejilerinin değerlendirilmesine yönelik bulanık karar matrisi

Alternatif / Kriter	C₁ (Teknoloji)	C₂ (İnsan)	C₃ (Sürdürülebilirlik)	C₄ (Ekonomi)
A ₁ Otomotiv	(5, 7, 9)	(3, 5, 7)	(3, 5, 7)	(5, 7, 9)
A ₂ Sağlık	(5, 7, 9)	(7, 9, 9)	(3, 5, 7)	(3, 5, 7)
A ₃ Gıda	(3, 5, 7)	(3, 5, 7)	(7, 9, 9)	(3, 5, 7)
A ₄ Elektronik	(7, 9, 9)	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)

Adım 1. Normalize Karar Matrisi

İlk aşamada, bulanık karar matrisinde yer alan alternatiflerin kriterlere ilişkin değerleri normalize edilmiştir. Çalışmada kullanılan tüm kriterler fayda türünde olduğundan, her bir kriter için en yüksek değer referans alınmış ve diğer değerler bu değere oranlanmıştır. Bu işlem sayesinde farklı ölçeklerde ifade edilen kriterler ortak bir ölçekte karşılaştırılabilir hale getirilmiş ve alternatifler arası

tutarlı bir kıyaslama imkânı sağlanmıştır. Normalizasyon süreci, üçgensel bulanık sayılar (l,m,u) üzerinden bileşen bazında ayrı ayrı uygulanmış ve her kriter için $[0-1]$ aralığında değerler elde edilmiştir. Bu değerler Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. Endüstri 5.0 uygulama stratejilerinin değerlendirilmesine yönelik normalize karar matrisi

Alternatif	C ₁ (Teknoloji)	C ₂ (İnsan)	C ₃ (Sürdürülebilirlik)	C ₄ (Ekonomi)
A ₁ Otomotiv	(0.556, 0.778, 1.000)	(0.333, 0.556, 0.778)	(0.333, 0.556, 0.778)	(0.556, 0.778, 1.000)
A ₂ Sağlık	(0.556, 0.778, 1.000)	(0.778, 1.000, 1.000)	(0.333, 0.556, 0.778)	(0.333, 0.556, 0.778)
A ₃ Gıda	(0.333, 0.556, 0.778)	(0.333, 0.556, 0.778)	(0.778, 1.000, 1.000)	(0.333, 0.556, 0.778)
A ₄ Elektronik	(0.778, 1.000, 1.000)	(0.556, 0.778, 1.000)	(0.556, 0.778, 1.000)	(0.556, 0.778, 1.000)

Adım 2. Ağırlıklandırılmış Normalize Matris

Tablo 5'te verilen normalize edilmiş değerler, kriterlerin önem düzeylerini yansıtmak amacıyla uzmanlar tarafından belirlenen ağırlıklar ile çarpılmıştır. Burada teknolojik faktörlerin ağırlığı %25, insani faktörlerin %25, sürdürülebilirliğin %25 ve ekonomik faktörlerin %25 olarak alınmıştır. Bu işlem sonucunda her alternatifin normalize değerleri, kriterlerin görece önemini de dikkate alacak şekilde güncellenmiştir. Böylece kriterler arasında adil ve ağırlıklı bir karşılaştırma yapılması sağlanmıştır.

Tablo 5. Endüstri 5.0 uygulama stratejilerinin değerlendirilmesine yönelik ağırlıklandırılmış normalize matris

Alternatif	C ₁ (Teknoloji)	C ₂ (İnsan)	C ₃ (Sürdürülebilirlik)	C ₄ (Ekonomi)
A ₁ Otomotiv	(0.139, 0.194, 0.250)	(0.083, 0.139, 0.194)	(0.083, 0.139, 0.194)	(0.139, 0.194, 0.250)
A ₂ Sağlık	(0.139, 0.194, 0.250)	(0.194, 0.250, 0.250)	(0.083, 0.139, 0.194)	(0.083, 0.139, 0.194)
A ₃ Gıda	(0.083, 0.139, 0.194)	(0.083, 0.139, 0.194)	(0.194, 0.250, 0.250)	(0.083, 0.139, 0.194)

Alternatif	C ₁ (Teknoloji)	C ₂ (İnsan)	C ₃ (Sürdürülebilirlik)	C ₄ (Ekonomi)
A ₄ Elektronik	(0.194, 0.250, 0.250)	(0.139, 0.194, 0.250)	(0.139, 0.194, 0.250)	(0.139, 0.194, 0.250)

Adım 3. Pozitif İdeal Çözüm ve Negatif İdeal Çözümün Belirlenmesi

Ağırlıklandırılmış normalize matris üzerinden her kriter için en iyi (pozitif ideal) ve en kötü (negatif ideal) değerler seçilmiştir. Pozitif ideal çözüm, kriterlerin fayda türünde olması nedeniyle en yüksek değerlerden oluşurken; negatif ideal çözüm en düşük değerlerden oluşmuştur. Pozitif ideal çözüm, stratejilerin ulaşması gereken en iyi durumları, negatif ideal çözüm ise kaçınılması gereken en kötü durumları temsil etmektedir (Tablo 6)

Tablo 6. Endüstri 5.0 uygulama stratejilerinin değerlendirilmesine yönelik ideal çözüm matrisi

Kriter	(A ⁺)	(A ⁻)
C ₁ Teknoloji	(0.194, 0.250, 0.250)	(0.083, 0.139, 0.194)
C ₂ İnsan	(0.194, 0.250, 0.250)	(0.083, 0.139, 0.194)
C ₃ Sürdürülebilirlik	(0.194, 0.250, 0.250)	(0.083, 0.139, 0.194)
C ₄ Ekonomi	(0.139, 0.194, 0.250)	(0.083, 0.139, 0.194)

Adım 4. Uzaklıkların Hesaplanması

Her alternatif için pozitif ideal çözüm ve negatif ideal çözüme olan uzaklıklar Tablo 7’de ayrı ayrı hesaplanmıştır. Alternatiflerin ideal çözüme olan uzaklığı, onların stratejik başarı potansiyellerini ortaya koymaktadır. Daha küçük D_i⁺ değeri, alternatifin en iyi çözüme daha yakın olduğunu; daha büyük D_i⁻ değeri ise alternatifin en kötü çözüme uzak olduğunu göstermektedir.

Tablo 7. Alternatiflerin ideal çözüme olan uzaklığı

Alternatif	D _i ⁺	D _i ⁻
A ₁ Otomotiv	0.85	0.92
A ₂ Sağlık	0.70	1.05
A ₃ Gıda	0.90	0.80
A ₄ Elektronik	0.65	1.20

Adım 5. Yakınlık Katsayısı (C_i)

Son aşamada her alternatif için yakınlık katsayısı (C_i) hesaplanmıştır. Bu oran, bir alternatifin pozitif ideale olan yakınlığını ve negatif idealden uzaklığını aynı anda göstermektedir. C_i değeri 1'e ne kadar yakınsa, ilgili alternatifin Endüstri 5.0 uygulama stratejisi açısından o kadar öncelikli olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 8. Alternatiflerin öncelik matrisi

Alternatif	d^+	d^-	C_i	Sıra
A ₁ Otomotiv	0.85	0.92	0.52	3
A ₂ Sağlık	0.70	1.05	0.60	2
A ₃ Gıda	0.90	0.80	0.47	4
A ₄ Elektronik	0.65	1.20	0.65	1

Çalışmada yapılan hesaplamalar sonucunda Tablo 8'de görüldüğü üzere elektronik sektörü (A₄) en yüksek C_i değerini alarak ilk sırada yer alırken, gıda sektörü (A₃) en düşük değeri alarak son sırada kalmıştır.

4.Sonuçlar

Bu çalışmada Endüstri 5.0 uygulama stratejilerinin sektörler bazında önceliklendirilmesi için Bulanık TOPSIS yöntemi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, Elektronik sektörü (A₄) en yüksek yakınlık katsayısına (0.65) sahip olup, Endüstri 5.0 stratejilerinin öncelikli olarak uygulanabileceği alan olarak öne çıkmıştır. Bu durum, elektronik sektöründe IoT, yapay zekâ ve akıllı üretim teknolojilerinin hızlı adaptasyon kapasitesinden kaynaklanmaktadır. Sağlık sektörü (A₂), insani faktörlerin ön planda olması nedeniyle ikinci sırada yer almış, kişiselleştirilmiş tedavi ve yapay zekâ tabanlı karar destek sistemleriyle Endüstri 5.0'ın insan merkezli hedefleriyle yüksek uyum göstermiştir. Otomotiv sektörü (A₁) üçüncü sırada yer almış, cobot uygulamaları ve elektrikli araç teknolojilerinde ilerleme kaydetmesine rağmen insani ve sürdürülebilirlik faktörlerinde görece zayıf kalmıştır. Gıda sektörü (A₃) ise sürdürülebilirlik kriterinde güçlü bir performans sergilese de teknolojik ve ekonomik boyutlarda diğer sektörlerin gerisinde kalarak son sırada yer almıştır.

Bulgular, Endüstri 5.0 stratejilerinin önceliklendirilmesinde yalnızca teknolojik faktörlerin değil, insani ve sürdürülebilirlik boyutlarının da kritik rol oynadığını göstermektedir. Elektronik sektörünün ilk sırada yer alması, dijital teknolojilere hızlı adaptasyon yeteneğinin stratejik üstünlük sağladığını ortaya koymaktadır. Sağlık sektörünün yüksek sıralaması ise Endüstri 5.0'ın insan merkezli vizyonuyla doğrudan uyumlu olduğunu kanıtlamaktadır. Buna karşın, otomotiv ve gıda sektörlerinde teknolojik ve ekonomik faktörlerin daha sınırlı etkili olduğu görülmüştür. Bu bulgular, Endüstri 5.0 stratejilerinin

uygulanmasında sektörlerin farklı güçlü ve zayıf yönlerinin dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

Bu çalışma, Endüstri 5.0 uygulama stratejilerinin sektör bazında önceliklendirilmesine yönelik olarak bulanık TOPSIS yöntemini kullanarak sistematik bir yaklaşım geliştirmektedir. Literatürde genellikle kavramsal tartışmalar veya tek bir sektöre odaklanan vaka analizleri öne çıkarken, burada farklı sektörlerin karşılaştırmalı biçimde ele alınması çok boyutlu bir değerlendirme imkânı sunmaktadır. Ayrıca, teknolojik, insani, sürdürülebilirlik ve ekonomik faktörlerin aynı modelde bütünleştirilmesi, Endüstri 5.0'ın yalnızca teknolojiye dayalı bir dönüşüm değil; insan, çevre ve ekonomi boyutlarını da kapsayan bütüncül bir paradigma olduğunu ortaya koymaktadır. Bu yönüyle çalışma hem akademik alanda hem de politika yapıcılar ve işletmeler için stratejik yol haritalarının geliştirilmesinde kullanılabilecek değerli bir metodolojik çerçeve sağlayabilmektedir.

Gelecek çalışmalarda bu araştırmanın kapsamı daha da genişletilebilir. Öncelikle, enerji, lojistik ve eğitim gibi farklı sektörlerin analize dâhil edilmesiyle Endüstri 5.0 uygulama stratejilerinin sektörel çeşitliliği daha ayrıntılı biçimde incelenebilir. Ayrıca, kriter seti genişletilerek etik, regülasyon ve dijital güvenlik boyutlarının modele eklenmesi, daha bütüncül bir değerlendirme imkânı sağlayacaktır. Yöntemsel açıdan ise DEMATEL, ANP ve BWM gibi farklı çok kriterli karar verme teknikleriyle karşılaştırmalı analizlerin yapılması, bulguların geçerliliğini artıracaktır. Son olarak, bölgesel veya ülke bazlı veri setleri üzerinden gerçekleştirilecek ampirik uygulamalar, firmalardan ve politika yapıcılardan elde edilecek saha verileriyle desteklendiğinde, daha kapsamlı ve güvenilir sonuçlara ulaşılması mümkün olabilir.

Kaynakça

- Barros, P., Fraga-Lamas, T. M., Fernández-Caramés, C. I., & Lopes, S. I. (2024). A cost-effective thermal imaging safety sensor for Industry 5.0 and collaborative robotics. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2410.23377>
- Breque, M., De Nul, L., & Petridis, A. (2021). *Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*. European Commission. <https://doi.org/10.2777/308407>
- Bucci, I., et al. (2024). Exploring the role of human digital twins in Industry 5.0. *Sustainability*, 17(1), 129. <https://doi.org/10.3390/su17010129>
- Büyüközkan, G., & Göçer, F. (2018). Digital supply chain: Literature review and a proposed framework for future research. *Computers in Industry*, 97, 157–177. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.02.010>
- Chen, C.-T. (2000). Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy Sets and Systems*, 114(1), 1–9. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(97\)00377-1](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(97)00377-1)
- Demirkan, H., & Spohrer, J. C. (2021). The future of service systems: Human-centered and sustainable. *Journal of Service Research*, 24(1), 3–7. <https://doi.org/10.1177/1094670520958077>
- Fazlollahtabar, H., et al. (2025). Industry 5.0 paradigm transformation adoption in [çalışma alanı]. *Scientific Reports*, 15, Article 16089. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-16089-z>
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group*. Forschungsunion.
- Nahavandi, S. (2019). Industry 5.0—A human-centric solution. *Sustainability*, 11(16), 4371. <https://doi.org/10.3390/su11164371>
- Pacheco, D. A. J. (2024). Unravelling human-centric tensions towards Industry 5.0. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 17(2), 205–220. <https://doi.org/10.1016/j.jiem.2024.100018>
- Tran, N. T., et al. (2024). An integrated approach of fuzzy AHP-TOPSIS for multi-criteria decision making in robotics selection. *Processes*, 12(8), 1723. <https://doi.org/10.3390/pr12081723>
- Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., & Wang, L. (2021). Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 530–535. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006>
- Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Kildienė, S. (2014). State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods. *Technological and Economic Development of Economy*, 20(1), 165–179. <https://doi.org/10.3846/20294913.2014.892037>



BÖLÜM 6

Mikrobiyal Yağların Fonksiyonel Özellikleri ve Endüstriyel Potansiyeli

Yasemin Henden¹ & Tuncay Gümüş² & Deniz Damla Altan Kamer³ & Emel Yücel⁴

1. GİRİŞ

Mikrobiyal yağlar, literatürde "Tek Hücre Yağları" (THY) olarak adlandırılmakta olup; bakteriler, mayalar, küfler ve mikroalgler gibi lipid sentezleme kapasitesine sahip mikroorganizmalar tarafından üretilen ve kuru hücre ağırlığının %20'sini aşan lipid içeriğine sahip bileşiklerdir (Ratledge, 1991). Bu lipidler, uzun yıllardır bitkisel yağlara alternatif bir kaynak olarak değerlendirilmektedir. Biyokimyasal nitelikleri ve çeşitli alanlardaki (ör. gıda, ilaç, kozmetik, biyoyakıt) potansiyel uygulamaları nedeniyle yoğun bir araştırma odağı hâline gelmiştir. Ayrıca bazı mikroorganizmalar, yüksek değerli çoklu doymamış yağ asitleri (PUFA'lar) olan araşidonik asit (ARA), dokosaheksaenoik asit (DHA) ve gama-linolenik asit (GLA) üretim kapasiteleriyle dikkat çekmekte ve bu yönleriyle önemli bir araştırma alanını teşkil etmektedir (Ward & Singh, 2005).

THY'nin ilk ticari üretimi, 1985 yılında *Mucor circinelloides* kullanılarak GLA açısından zengin bir yağın elde edilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu üretim, yüksek maliyet nedeniyle çuha çiçeği yağına alternatif olarak planlanmış ve karıştırılmalı tank fermentörlerinde gerçekleştirilen büyük ölçekli fermantasyon, biyokütle hasadı, kurutma ve yağ ekstraksiyonu gibi temel süreçleri içermektedir (Akoh, 2005). Ancak yüksek maliyet gibi ekonomik nedenlerle üretim altı yıl içinde sonlandırılmıştır. Bu kısa süreli deneyime rağmen, mikrobiyal yağların ticari olarak üretilbilir olduğu ve geleneksel ekstraksiyon yöntemleriyle izole edilebileceği kanıtlanmıştır (Guschina & Harwood, 2006).

¹ Arş. Gör., Gıda Mühendisliği Bölümü, Ziraat Fakültesi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ 59030, Türkiye. ORCID: 0009-0009-9681-970X

² Prof. Dr., Gıda Mühendisliği Bölümü, Ziraat Fakültesi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ 59030, Türkiye. ORCID: 0000-0001-7635-5519

³ Doç. Dr., Gıda Mühendisliği Bölümü, Ziraat Fakültesi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ 59030, Türkiye. ORCID: 0000-0002-9119-5979

⁴ Dr., Gıda Mühendisliği Bölümü, Ziraat Fakültesi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ 59030, Türkiye. ORCID: 0000-0002-6750-4030

Mikrobiyal yağların fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri, kullanım alanlarına göre değişiklik gösterebilmekte; bu farklılıklar, söz konusu lipidlerin fonksiyonelliğini belirlemektedir. Fonksiyonellik kavramı, bu yağların yalnızca enerji kaynağı olmalarının ötesinde, sağlık, beslenme ve endüstriyel uygulamalar açısından sundukları ilave yararları kapsamaktadır. Örneğin, omega-3 ve omega-6 yağ asitleri içeren fonksiyonel yağlar, kardiyovasküler sağlığın desteklenmesi ve inflamasyonun azaltılması gibi olumlu etkilere sahip olabilir. THY üzerine yapılan bilimsel çalışmalar, özellikle lipid biyosentez yolları, temel enzimler ve metabolik ara ürünlerin anlaşılması üzerine yoğunlaşmıştır (Botham & Ratledge, 1979; Morgunov vd., 2004; Polakowski vd., 1999; Ratledge vd., 1997). Ayrıca, yüksek verimli THY üreticilerinin belirlenmesine yönelik tarama yöntemlerinin geliştirilmesine ilişkin önemli araştırmalar gerçekleştirilmiştir (Evans & Ratledge, 1983; Wu vd., 2005). Özellikle *Mucorales* takımına ait *Mucor circinelloides* ve *Mortierella* türleri, güçlü GLA üreticileri olarak tanımlanmıştır (Çertik vd., 1997; Shaw, 1966). Günümüzde bazı endüstriyel süreçler başarıyla uygulanmakta olup (Fakas vd., 2008; Nakahara vd., 1992), GLA'nın kanser önleyici özelliklerine yönelik artan bilimsel ilgi, mikrobiyal kaynaklı üretime yönelik araştırmaları yeniden gündeme taşımıştır (Das, 2004; Kenny vd., 2000).

Mikrobiyal yağlar, sağlık alanındaki uygulamaların yanı sıra, gıda endüstrisinde özellikle kakao yağı ikamesi (CBS) olarak da değerlendirilmektedir. Lipid profili itibarıyla kakao yağına benzerlik gösteren bazı mikrobiyal yağların, bu amaçla kullanılabileceği bildirilmiştir (Moreton, 1985; Ykema, Kater, vd., 1989). 1980'li yıllarda peynir altı suyu gibi düşük maliyetli substratlarla CBS üretimi gerçekleştirebilen maya suşları tanımlanmıştır (Davies, 1988). Ancak, kakao yağı fiyatlarındaki dalgalanmalar, büyük ölçekli üretimin ekonomik sürdürülebilirliğini olumsuz etkilemiştir. Buna karşın, bu alandaki bilimsel çalışmalar halen devam etmektedir (Papanikolaou vd., 2001). Biyoteknolojik uygulamalarda ise mikrobiyal yağların biyoyakıt üretimi ve kozmetik sanayi gibi alanlarda kullanım potansiyeli bulunmaktadır. Bu bağlamda, söz konusu yağların işlevselliği, çok yönlü kullanım avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Artan petrol fiyatları ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına duyulan gereksinim, mikrobiyal yağlara yönelik ilgiyi son yıllarda kayda değer biçimde artırmıştır. Bitkisel yağların biyodizel üretiminde kullanılması ise, gıda güvenliği ve ekilebilir arazi kullanımı açısından çeşitli tartışmalara yol açmaktadır (Chisti, 2007; Li vd., 2007). Bununla birlikte, mikrobiyal lipid üretiminin yüksek maliyetli oluşu, bu alternatifin ekonomik açıdan uygulanabilirliğini sınırlandıran başlıca faktörlerden biridir. Bu nedenle,

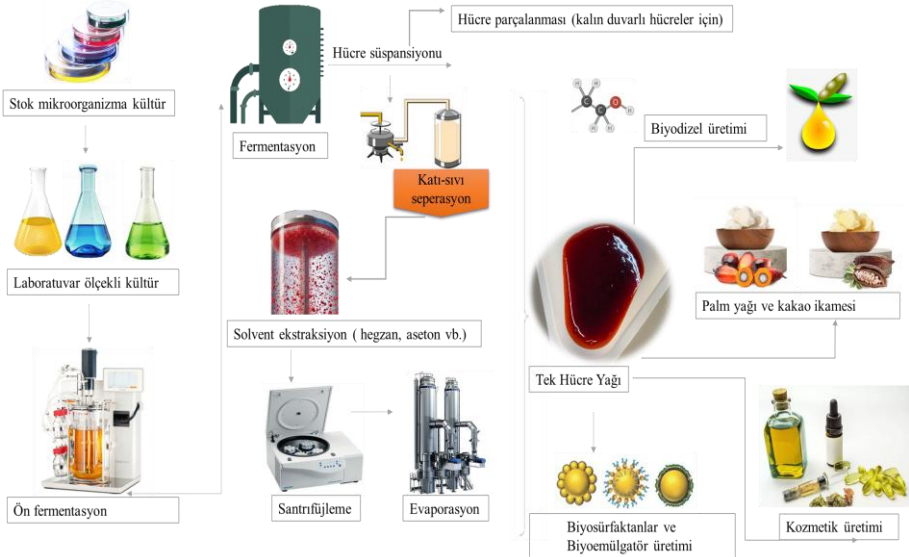
lignoselülozik biyokütle gibi düşük maliyetli substratların kullanımına yönelik maliyet azaltıcı stratejilerin geliştirilmesi gerekmektedir. Artan küresel enerji talebi ve tarımsal üretim alanlarının sınırlılığı dikkate alındığında, mikrobiyal yağlar gelecek vaat eden, ancak ekonomik açıdan hâlâ bazı zorluklar barındıran bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Bu yağların endüstriyel ölçekte uygulanabilmesi için fermantasyon teknolojisindeki gelişmeler, genetik mühendislik teknikleriyle mikroorganizma suşlarının iyileştirilmesi ve substrat optimizasyonu gibi faktörlerin kritik öneme sahip olduğu vurgulanmaktadır (Meng vd., 2009; Ratledge & Cohen, 2008).

THY'lerin fonksiyonelliğini artıran bir diğer unsur ise içerdiği renk pigmentleridir. Mikrobiyal yağlarda bulunan karotenoidler (örneğin beta-karoten) ve klorofiller gibi doğal pigmentler yalnızca görsel özellik kazandırmakla kalmayıp, aynı zamanda antioksidan, antimikrobiyal ve anti-inflamatuar etkileri ile sağlık açısından ek faydalar sunmaktadır. Bu pigmentler, mikrobiyal yağların fonksiyonel değerine önemli katkılar sağlamaktadır.

Bu derlemede, mikrobiyal yağların fonksiyonel özelliklerine ve çeşitli endüstriyel uygulamadaki potansiyellerine ilişkin mevcut bilgiler bütüncül bir yaklaşımla ele alınmıştır.

2. THY ÜRETİMİ

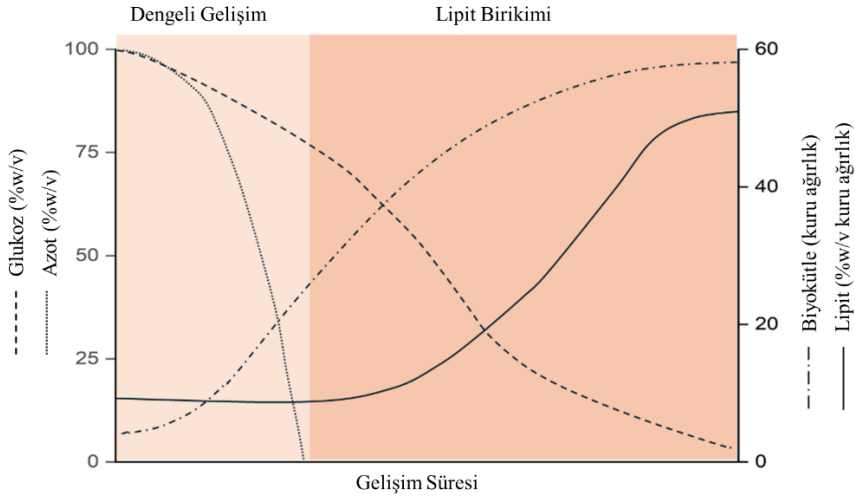
THY üretim sürecine ilişkin genel akış şeması Şekil 1'de özetlenmiştir.



Şekil 1. Endüstriyel Mikrobiyal Yağ Üretim Prosesi (Yücel ve ark, 2024)

Bu üretim süreci, biyokütle üretimi ve lipid birikimi olmak üzere iki ana aşamadan oluşmaktadır. Sürecin ilk aşamasında, mikroorganizmaların çoğalmasını destekleyici nitelikte zengin besin içeriğine sahip bir kültür ortamı kullanılmaktadır. Bu ortam koşulları, hücre bölünmesini hızlandırarak biyokütle oluşumunu teşvik etmektedir. İkinci aşamada ise, mikroorganizmalar çevresel stres koşullarına özellikle azot sınırlaması gibi maruz bırakılmaktadır. Bu tür sınırlayıcı koşullar, hücrelerin hayatta kalma stratejisi olarak lipid birikimi gerçekleştirmelerine neden olmaktadır (Yücel ve ark., 2024). Lipid birikimi genellikle, ortamda yüksek miktarda karbon kaynağının bulunması ve büyüme için gerekli temel elementlerden birinin (örneğin azot) yetersiz hâle gelmesi ile indüklenmektedir. Her ne kadar farklı besin elementlerinin sınırlanması lipid sentezini artırabilse de en yaygın ve etkili strateji azot sınırlamasına dayanmaktadır. Bu koşullar altında, hücresel karbon metabolizması lipid sentezine yönlendirilmekte ve hücre içinde triaçilgliserol (TAG) formunda lipid gövdeleri oluşmaktadır (Gao vd., 2013; Sun vd., 2014). Mikroorganizmaların lipid birikimi ile ilgili grafik Şekil 2’de verilmiştir.

Lipid üretiminin artırılmasına yönelik olarak çeşitli biyokütle üretim stratejileri geliştirilmiştir (Béligon, Molina, vd., 2016). Bu stratejiler arasında kesikli (batch) (Fakas, Papanikolaou, Galiotou-Panayotou, vd., 2009; Patil & Gogate, 2015; Sun vd., 2014), beslemeli kesikli (fed-batch)(Ji vd., 2014; Ling vd., 2015a; Zhao vd., 2011) ve sürekli (continuous) kültürleme yöntemleri (Shen vd., 2013) yer almaktadır. Uygun kültürleme yönteminin seçimi yalnızca lipid veriminin artırılması açısından değil, aynı zamanda sürecin ekonomik açıdan sürdürülebilirliği açısından da kritik bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, endüstriyel ölçekte verimli üretim süreçlerinin gerçekleştirilebilmesi için kimya mühendisliğine özgü tasarım ve kontrol ilkelerinin etkin bir şekilde uygulanması gerekmektedir.



Şekil 2. Yağlı mikroorganizmalar tarafından lipid birikimi (Kanat, 2013)

THY eldesinde önemli bir işlem parametresi olan Fermantasyon sürecinin tamamlanmasının ardından elde edilen biyokütle, santrifüjleme, filtrasyon veya diğer katı-sıvı ayırma teknikleriyle ortamdan ayrılarak geri kazanılmaktadır (Yücel ve ark., 2024). Çoklu doymamış yağ asitleri (PUFA) bakımından zengin olan yağların, rafinasyon sürecine geçmeden önce oksidatif bozulmalara karşı korunması büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle, bu tür yağların inert atmosfer koşullarında genellikle nitrojen gazı altında ve düşük sıcaklıklarda saklanması gerekmektedir (Winwood, 2013). Yağların saflaştırılması amacıyla uygulanan rafinasyon adımları, çoğunlukla bitkisel yağ endüstrisinde kullanılan geleneksel işlemlerle benzerlik göstermektedir (Finco vd., 2017). Bu işlemler, üründeki istenmeyen bileşenlerin uzaklaştırılmasını ve ürünün kalite standartlarına uygun hâle getirilmesini amaçlamaktadır.

2.1. THY Üretiminde Kullanılan Mikroorganizma Kaynakları

Mikroorganizma kültürleri, bitkiler veya balıklar gibi diğer yağlı türlerin kültürüne kıyasla çeşitli avantajlara sahiptir (Ward & Singh, 2005). Bu mikroorganizmalar, iklimsel veya coğrafi kısıtlamalardan bağımsız olarak geliştirilebilmekte ve ekilebilir arazi kullanımını gerektirmemektedir. Bu özellikleri, özellikle yeterli ekilebilir arazi olmayan bölgelerde sürdürülebilir üretim açısından önemli bir avantaj teşkil etmektedir. Mikroorganizmaların bir diğer önemli avantajı, endüstriyel atıklar da dâhil olmak üzere çeşitli substrat türlerinde geliştirilebilmeleridir. Karbon kaynakları, tipik fermantasyon süreçlerinde toplam üretim maliyetinin %60'ından fazlasını oluşturduğundan, düşük maliyetli ve atık tabanlı karbon kaynaklarının kullanımı ekonomik açıdan

büyük önem taşımaktadır. Bununla birlikte, küresel düzeyde artan nüfus, poliansatüre yağ asitleri (PUFA) bakımından zengin gıdalara olan talebi artırmaktadır. Örneğin, günlük kişi başı 500 mg düzeyinde hesaplanan omega-3 PUFA ihtiyacına göre, toplam talebin yaklaşık 1,274 milyon ton seviyesinde olduğu tahmin edilmektedir. Buna karşın, balık kaynaklı mevcut arzın yalnızca 0,84 milyon ton düzeyinde kaldığı bildirilmektedir. Bu veriler, yaklaşık 0,434 milyon tonluk bir arz açığına işaret etmekte ve alternatif PUFA kaynaklarına yönelik araştırmaların önemini vurgulamaktadır (Raatz ve ark. 2013). Geleneksel gıda kaynaklarında bulunan temel besin bileşenlerine alternatiflerin geliştirilmesi, sürdürülebilirlik ilkesine dayanan üretim stratejileri açısından kritik bir gereklilik hâline gelmiştir.

Algler, mantarlar ve mayalar lipit sentezleme kapasitesine sahip mikroorganizma grupları arasında yer almaktadır. Ancak mevcut bilimsel literatür, küf ve mayaların bu alanda en fazla araştırılan ve endüstriyel olarak en rekabetçi gruplar olduğunu ortaya koymaktadır. Öte yandan, bakteriler tarafından PUFA üretimi üzerine yapılan çalışmalar oldukça sınırlı düzeydedir. Mevcut veriler, yalnızca belirli laktik asit bakterilerinin ve bazı rumen bakterilerinin PUFA üretebildiğini ve bu üretimin esas olarak konjuge linoleik asit (CLA) ile sınırlı olduğunu göstermektedir (Vela Gurovic vd., 2014; Xing vd., 2012). Tablo 1’de PUFA üretme kapasitesine sahip bazı mikroorganizmalar ve ürettikleri PUFA oranları verilmiştir. (Tablo 1)

Tablo 1. PUFA Üretiminde Rol Oynayan Suşlar (Bélignon, Christophe, vd., 2016)

Suş	Substrat	Kültürleme yöntemi	Deneysel koşullar	Lipit miktarı (%kuru madde w/w)	PUFA miktarı (%toplam yağ asitleri w/w)	Kaynak
<i>Mortierella elongata</i>	Soya yağı 3%	Erlenmayer	Soya yağının farklı konsantrasyonları	24	58 (ARA)	(Cheng vd., 1999)
<i>Pythium irregular</i>	Soya yağı 3%			29	13 (EPA) 3.3 (ARA)	
<i>Cunninghamella echinulate</i>	Ksiloz	Erlenmayer	C/N 285	23.8	4.3 (EPA) 22 (GLA)	(Fakas, Papanikolaou, Batios, vd., 2009)
<i>Mortierella isabellina</i>	Ksiloz	Erlenmayer	C/N 78	53.6	16.7 (GLA)	
	Ham gliserol		C/N 285	64	4.1 (GLA)	
	Ham gliserol		C/N 117	22.7	11.6 (GLA)	
<i>Mortierella alpine</i>	Pirinç kepeği	Katı Faz Fermentasyonu	C/N 157	21.7	12.8 (GLA) 16.9 (EPA)	(Jang & Yang, 2008)
<i>Aurantiochytrium limacinum</i>	Gliserol	Besimeli kesikli kültürleme (10 L)	Azot takviyesi C/N 0.5	51.4–60.8	2.7 (ALA) 49.5–55.2 (DHA)	(Huang vd., 2012)
			C/N 1.25	49–72	51.4–58.2 (DHA)	
			C/N 1.875	47.3–65.2	57.3–66.6 (DHA)	
<i>Schizochytrium sp.</i>	Glukoz	Erlenmayer	Konsantrasyon 5–150 g/L	43.95 28.3	20.96 (DHA) 10.78 (DHA)	(Zhang vd., 2013)
<i>M. isabellina</i>	Ksiloz	Erlenmayer	Havalandırılmalı membran reaktör	55 71	15 (DHA) 10.9 (ALA)	(Gao vd., 2013)

<i>M. isabellina</i>	Ksiloz	Erlenmayer	3 farklı substrat	66.7	2.5 (GLA)	(Zeng vd., 2013)
	Glukoz	Erlenmayer		66.5	17.8	
	Buğday samanı hidro-lizati	Erlenmayer		53	14.3	
<i>Schizochytrium</i> sp. S31	Gliserol	Beslemeli kesikli kültürleme	$K_{1/2} = 568$	52.9	35.9 (DHA)	(Chang, Luo, vd., 2013)
		Erlenmayer	Glycerol 75 g/L	52	44 (DHA)	
		Günlü tabanlı erlenmayer	Gliserol 100 g/L	47.9	35.3 (DHA)	
<i>M. alpina</i>	Glukoz + maya ekstraktı	Beslemeli kesikli kültürleme	Tekrarlı besleme	50	43 (ARA)	(Ji vd., 2014)
<i>Aurantiochytrium</i> sp. TC9	Pure gliserol	Erlenmayer	Farklı suşların karşılaştırılması		55.2 (DHA)	(Lee Chang vd., 2015a)
<i>Aurantiochytrium</i> sp. TC20	Ham gliserol	Erlenmayer			33.9 (DHA)	
	Saf gliserol				54.3 (DHA)	
<i>Schizochytrium</i> sp. LU310	Ham gliserol	Erlenmayer	C ve N besleme stratejileri	67.3	31 (DHA)	(Ling vd., 2015a)
	Glukoz				27.5 (DHA)	
<i>Schizochytrium</i>	Glukoz	Erlenmayer		70	15 (DHA)	(Pati & Gogate, 2015)
<i>limacinum</i> SR21	Glukoz + gliserol	Erlenmayer		80.2	18.3 (DHA)	

2.1.1. Küfler

Mortierella isabellina, *Mortierella alpina* ve *Cunninghamella* gibi bazı küf türlerinin lipid sentezleme yeteneğine sahip olduğu bilinmektedir (Tablo 1). Bu mikroorganizma türleri, özellikle gama-linolenik asit (GLA) ve eikosapentaenoik asit (EPA) gibi biyolojik olarak önemli uzun zincirli çoklu doymamış yağ asitlerinin üretiminde ön plana çıkmaktadır (Gao vd., 2013; Gorissen vd., 2012).

1985 yılında yapılan bir çalışmada, *Mucor circinelloides* türünün, akşam çuha çiçeği yağı ile karşılaştırıldığında yaklaşık iki kat daha yüksek oranda GLA (%18–22) üretme kapasitesine sahip olduğu bildirilmiş ve bu özelliği nedeniyle araştırmalarda tercih edildiği belirtilmiştir. Bu tarihten itibaren, mantarlar aracılığıyla GLA üretimine yönelik bilimsel çalışmalar artış göstermiştir. Özellikle *M. isabellina* ve *Cunninghamella echinulata* suşlarının, mikrobiyal GLA üretimi açısından umut vadeden mikroorganizmalar olduğu yapılan araştırmalarla ortaya konmuştur. *Mortierella* cinsi, özellikle doğal (yabani) suşlarında toplam yağ asidi içeriğinin %50'sine kadar araşidonik asit (ARA) içerebilmesi nedeniyle, ARA üretiminde en önemli mikrobiyal kaynaklardan biri olarak kabul edilmektedir. Günümüzde ise *M. alpina*, ARA açısından zenginleştirilmiş diyet takviyelerinin üretiminde kullanılmak üzere ticarileşmiş ve bu tür, endüstriyel ölçekte ARA üretimi amacıyla yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır.

2.1.2. Mayalar

Rhodospiridium, *Lipomyces*, *Yarrowia* ve *Cryptococcus* cinslerine ait bazı maya türlerinin, kuru hücre kütlelerinin %60'ına kadar lipid sentezleme kapasitesine sahip olduğu bildirilmiştir (Cheirsilp & Louhasakul, 2013; Yang vd., 2015). Çeşitli maya suşları tarafından sentezlenen lipidlerin yağ asidi bileşimlerine ilişkin veriler Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Çeşitli Maya Şuşları Tarafından Üretilen Lipitlerin Yağ Asidi Kompozisyonları (Papanikolaou & Aggelis, 2011)

Suş	Lipit (% w/w)	C16:0	C16:1	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3	Kaynak
<i>Candida</i> sp. 107	37.1	37	1	14	36	7	T.	Gill vd. 1977
<i>Candida</i> sp. 107	n.r.	28	n.r.	8	41	17	17	Davies 1988
<i>Candida</i> sp.	40.3	23	13	3	54	5	2	Aggelis vd. 1996
<i>Rhodotorula gracilis</i>	41.0	21	T.	13	51	11	3	Choi vd. 1982
<i>Candida curvata</i>	29.1	36	T.	14	40	7	T.	Evans and Ratledge 1983
<i>Candida curvata</i>	28.0	37	T.	10	44	6	T.	Evans and Ratledge 1983
<i>Apiotrichum curvarum</i>	31.0	34	T.	10	43	7	2	Hassan vd. 1993
<i>Cryptococcus curvatus</i>	38.0	24	T.	10	46	9	6	Hassan vd. 1994
<i>Cryptococcus curvatus</i>	25.0	18	T.	16	50	16	T.	Meesters vd. 1996
<i>Cryptococcus curvatus</i>	50.0	31	-	22	42	1	n.r.	Wu vd. 2010
<i>Cryptococcus albidus</i>	46.3	14	T.	9	53	18	2	Hansson and Dosta'lek 1986
<i>Cryptococcus albidus</i>	n.r	20	n.r	11	59	6	6	Davies 1988
<i>Yarrowia lipolytica</i>	43.2	15	2	11	47	21	3	Papanikolaou and Aggelis 2002
<i>Yarrowia lipolytica</i>	30.7	12	11	9	57	11	T.	Andre' vd. 2009
<i>Yarrowia lipolytica</i>	22.3	13	17	6	55	7	n.r.	Makri vd. 2010
<i>Rhodospiridium toruloides</i>	67.5	20	1	15	47	13	3	Li vd. 2007
<i>Rhodospiridium toruloides</i>	65.2	34	T.	13	48	1	T.	Hu vd. 2009
<i>Rhodospiridium toruloides</i>	62.1	26	2	5	62	3	T.	Wu vd. 2010
<i>Rhodospiridium toruloides</i>	55.6	43	T.	16	35	2	T.	Wu vd. 2011
<i>Lipomyces starkeyi</i>	68.0	56	2	14	26	T.	T.	Angerbauer vd. 2008

<i>Lipomyces starkeyi</i>	61.5	37	4	6	49	1	T.	Zhao vd. 2008
<i>Rhodotorula mucilaginosa</i>	48.6	22	2	9	55	11	T.	Zhao vd. 2010
<i>Trichosporon capitatum</i>	37.6	12	1	2	74	9	n.r.	Wu vd. 2011
<i>Rhodotorula</i> sp.	22.0	22	1	7	56	12	n.r.	Chatzifragkou vd. 2011
<i>Candida oleophila</i>	15.3	13	3	7	66	11	n.r.	Chatzifragkou vd. 2011

T. <0.5% w/w; n.r.: belirtilmemiş.

Mayaların intraselüler olarak yüksek miktarda yağ biriktirme kabiliyetleri, büyüme hızlarının oldukça yüksek olması ve TAG fraksiyonlarının bitki yağlarınınkiyle benzerlik göstermeleri sebebiyle bugüne kadar çalışmaların büyük bir kısmı mayalar üzerine gerçekleştirilmiştir. Mayalardan elde etmiş olunan mikrobiyal lipidlerin yaklaşık %80-90'ını TAG oluşturmaktadır. Ayrıca elde edilen bu yağların toksin ve alerjen içermediği bilinmektedir (Denli & Tekin, 2000). Yağlı mayalar, yüksek lipid verimleri, bitkisel yağ ile karşılaştırıldığında lipid yapılarının benzerliği ve ekim için oldukça az alan ihtiyacı gibi özelliklere sahip olması bakımından alg ve bakterilere göre birçok avantaj göstermektedir (Singh vd., 2022). Bununla birlikte, bu mayalar tarafından üretilen yağ asitlerinin büyük bir kısmı oleik, linoleik, palmitik ve palmitoleik asitlerden oluşmaktadır; bu durum ise söz konusu yağların belirli yağ asitlerinden oluşması nedeniyle gıda takviyesi olarak kullanımını sınırlı kılmaktadır.

Yağlı mayalarda lipid sentezinde görev alan metabolik yolların büyük ölçüde tanımlanmış olması, metabolik mühendislik uygulamalarıyla hedeflenen yağ asitlerinin üretiminin artırılmasına yönelik stratejilerin geliştirilmesini mümkün kılmaktadır (Bélignon, Molina, vd., 2016; Li vd., 2013; Tai & Stephanopoulos, 2013). Örneğin, *Yarrowia lipolytica*'da belirli genlerin aşırı ekspresyonu yoluyla hücre başına %61,7 oranında lipid verimi elde edilmiştir (Tai & Stephanopoulos, 2013). Benzer şekilde, β -oksidasyon sürecinde görev alan genlerin silinmesi, doğal suşlara kıyasla yaklaşık dört kat daha yüksek lipid birikimi ile sonuçlanmıştır (Beopoulos vd., 2008). Bu bulgular, metabolik mühendisliğin, karbon akışını lipid biyosentezine yönlendirme kapasitesi sayesinde, mikrobiyal lipid üretimini artırmada etkili bir araç olduğunu göstermektedir. Ayrıca, son yıllarda geliştirilen rekombinant maya suşlarının, diyet takviyesi olarak kullanım potansiyeline yönelik yürütülen çalışmalar, metabolik mühendislik temelli yaklaşımların biyoteknolojik ve endüstriyel uygulamalar açısından taşıdığı önemi daha da belirgin hâle getirmektedir (Zinjarde, 2014).

2.1.3. Bakteriler

Bakteriler, polihidroksi alkanoik asit ve diğer polihidroksi asitlerde görüldüğü gibi endüstriyel açıdan önemli kabul edilen lipidlerin üretiminde kullanılmaktadırlar. Bu bağlamda, *Rhodococcus*, *Mycobacterium*, *Streptomyces*, *Nocardia* ve *Acinetobacter* gibi bakteriyel cinsler ön plana çıkmaktadır (Koreti vd., 2022). Örneğin, *Streptomyces* türlerinin hücre kuru ağırlığının %60'ına kadar lipid biriktirebildiği, *Rhodococcus opacus* suşlarında ise bu oranın %76–87 aralığına kadar ulaşabildiği bildirilmiştir (Bharathiraja vd., 2017). Bu bakteriler organik asitler ve n-alkanlar gibi farklı karbon kaynakları üzerinde inkübasyon süresince farklı miktarlarda nötral lipid üretmektedirler. Ayrıca, bazı *Arthrobacter* türlerinde lipid birikiminin %80 düzeyine kadar çıkabildiği, *Mycobacterium*, *Corynebacterium* ve *Rhodococcus* türlerinde ise %30–40 aralığında lipid birikiminin gözlemlendiği rapor edilmiştir (Leman, 1997).

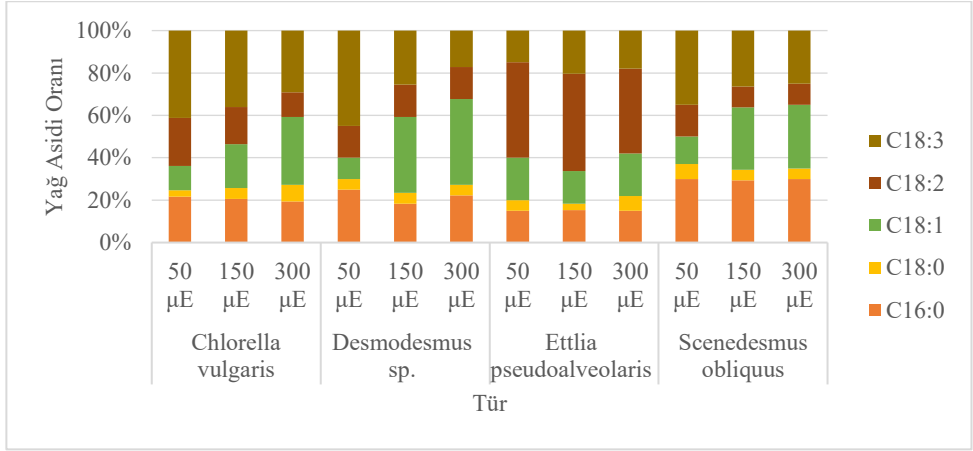
Yapılan araştırmalar, söz konusu bakterilerin triasilgliserol (TAG) biyosentezi sırasında oldukça çeşitli karbon kaynaklarını kullanabildiğini ortaya koymaktadır. Bu metabolik esneklik, özellikle endüstriyel atıkların değerlendirilmesi açısından bakterilerin mikrobiyal lipid üretimindeki potansiyelini önemli ölçüde artırmaktadır (Bharathiraja vd., 2017). Buna karşın, yağlı bakteriler, mikrobiyal yağ üretimi uygulamalarında halen yaygın olarak tercih edilmemektedir. Bu durumun başlıca nedenleri arasında, hücre içinde biriken lipidlerin dış ortama verimli şekilde salınmasının zorluğu ile üretilen yağlarla birlikte oluşabilecek potansiyel toksik ya da alerjenik metabolitlerin varlığı yer almaktadır (Leman, 1997). Bununla birlikte, bazı suşların sergilediği yüksek lipid akümülyasyon kapasitesi, bu alanda yapılacak gelecekteki araştırmalar açısından umut vaat eden bir perspektif sunmaktadır.

2.1.4. Mikroalgler

Her ne kadar hem mikroalgler hem de mayalar lipid biriktirme kapasitesine sahip organizmalar olarak bilinse de, mikroalglerden elde edilen lipidler genellikle çoklu doymamış yağ asitleri içermektedir. Bu durum, söz konusu lipidlerin oksidasyona karşı daha duyarlı olmasına ve dolayısıyla biyodizel üretiminde kullanım kapasitelerinin sınırlı olmasına neden olmaktadır. Buna ek olarak, mikroalglerin kültüve edilmesi geniş yüzey alanları ve uzun süren yaşlanma periyotları gerektirmekte olup, bu süreçler teknik ve ekonomik zorlukları da beraberinde getirmektedir. Buna karşın, yağlı mayalar daha hızlı büyüme oranları ve daha kısa üretim süreleri gibi avantajlar sunarak alternatif bir biyolipit kaynağı olarak öne çıkmaktadır (Darcan & Sarıgül, 2016). Mikroalglerden elde edilen lipidlerin, doymuş ve düşük düzeyde doymamış uzun

zincirli yağ asitleri içeriği açısından bitkisel yağlarla benzerlik göstermesi, biyoyakıt üretimi açısından önemli bir değerlendirme ölçütüdür. Literatürde bazı mikroalg türleri, çoklu doymamış yağ asitleri (PUFA) üretim potansiyelleri dolayısıyla önemli biyoteknolojik kaynaklar olarak tanımlanmıştır. Örneğin, *Nannochloropsis oceanica* CY2 suşunun EPA (eikosapentaenoik asit) üretme yeteneğine sahip olduğu bildirilmiştir (Chen vd., 2015). Benzer şekilde, *Porphyridium cruentum*, *Phaeodactylum tricornutum* ve *Chaetoceros calcitrans* gibi türlerin EPA sentezleyebildiği; *Isochrysis galbana* ile *Crypthecodinium* cinsine ait bazı türlerin ise DHA (dokosaheksaenoik asit) üretimi gerçekleştirdiği rapor edilmiştir (Guedes vd., 2011). Ayrıca, *Chlamydomonas reinhardtii* türü, lipid metabolizmasının moleküler düzeyde anlaşılması amacıyla sıklıkla model organizma olarak kullanılmaktadır (Guschina & Harwood, 2006). Mikroalglerin fotobiyoreaktör sistemlerinde yetiştirilmesi sırasında karşılaşılan temel teknik sınırlamalardan biri, ışığın kültür ortamında yeterli düzeyde hücrelere ulaşmasının zor olmasıdır (Cheng vd., 1999). Işık yoğunluğundaki artış hem biyokütle üretimi hem de lipid sentezi üzerinde türlere özgü farklı etkiler yaratmakta olup, bu durum üretim süreçlerinin optimizasyonu açısından her mikroalg türünün fizyolojik tepkilerinin ayrıntılı biçimde analiz edilmesini gerekli kılmaktadır. Nzayisenga ve ark. (2020), farklı ışık şiddetlerinin mikroalg yağ asidi profili üzerindeki etkilerini incelemiş; *C. vulgaris*, *Desmodesmus* sp. ve *S. Obliquus* türlerinde düşük ışıkta 16:0 ve 18:3 asitlerinin baskın, 18:2'nin ise en az bulunduğunu, ışık şiddeti arttıkça 18:3 miktarının azaldığını ve oksidasyona daha dayanıklı olan 18:1'in en baskın yağ asidi hâline geldiğini raporlamışlardır. Bu bulgular, ışık optimizasyonunun mikroalgal biyodizel kalitesini artırabileceğini göstermektedir.

Belirli ışık yoğunlukları altında bazı mikroalg suşlarına ait yağ asidi profilleri Şekil 2'de özetlenmiştir (Nzayisenga vd., 2020).



Şekil 2. Belirli ışık yoğunlukları altında bazı mikroalg suşlarının yağ asidi profilleri

* C18:3 - α -Linolenik Asit, C18:2 - Linoleik Asit, C18:1 - Oleik Asit, C18:0 - Stearik Asit, C16:0 - Palmitik Asit

Son yıllarda, *Thraustochytriales* ve *Dinoflagellata* türleri tarafından çoklu doymamış yağ asitleri (PUFA) üretimine yönelik araştırmalar giderek artış göstermektedir. *Thraustochytriales* üyeleri, başlangıçta deniz mantarları olarak sınıflandırılmış olup, günümüzde ise taksonomik açıdan heterokont alglerle ilişkilendirilen yaygın deniz mikroheterotroflarını kapsamaktadır (Dick, 2001). Özellikle *Schizochytrium* türleri, DHA (dokosaheksaenoik asit) üretiminde kültür koşullarının optimizasyonu bağlamında en çok çalışılan organizmalar arasında yer almaktadır (Chang, Gao, vd., 2013; Chang, Luo, vd., 2013; Gao vd., 2013; Lee Chang vd., 2015b; Ling vd., 2015b; Patil & Gogate, 2015).

Yüksek DHA üretim kapasiteleri nedeniyle, *Thraustochytriales* üyeleri, omega-3 yağ asidinin deniz ekosistemlerinden karasal ekosistemlere aktarımında kritik bir ekolojik rol üstlenmektedir. Mikroalglerin yağ asidi profillerine ilişkin literatürde yer alan veriler, Tablo 3'te özetlenmiştir.

Tablo 3. Mikroalglerin yağ asidi profiline ilişkin literatürde bildirilen çalışmalar. (Ferreira vd., 2019)

Mikroalg / Yağ Asidi Profili	<i>B. braunii</i> ¹	<i>B. terribilis</i> ²	<i>Chlorella</i> sp. ³	<i>C. sorokiniana</i> ⁴	<i>C. vulgaris</i> ⁵	<i>D. brasiliensis</i> ⁶	<i>Desmodesmus</i> sp. ⁷	<i>Nannochloropsis</i> sp. ⁸	<i>S. obliquus</i> ⁹	<i>S. obtusiusculus</i> ¹⁰
C4:0	0.37	2.41	–	–	–	–	–	–	–	–
C10:0	–	–	–	–	–	–	0.45	–	–	–
C12:0	–	–	0.51	0.80	2.11	1.76	14.96	–	0.24	–
C13:0	–	–	–	–	–	–	–	–	0.33	–
C14:0	0.68	0.38	0.69	7.90	0.86	0.70	7.30	6.8	0.21	–
C14:1	–	–	–	12.40	–	–	–	–	0.08	–
C16:0	9.36	6.27	19.03	6.20	35.77	26.19	18.91	31.58	27.39	30.2
C16:1	0.32	0.23	21.97	–	1.63	2.48	0.46	–	0.70	7.3
C16:2	–	–	–	13.0	–	–	–	–	–	–
C17:0	–	0.27	–	–	1.31	0.80	0.65	–	0.76	–
C17:1	2.68	0.96	–	–	8.51	8.59	–	–	0.14	4.0
C18:0	1.27	1.28	2.35	19.00	11.35	7.05	14.66	3.54	11.88	–
C18:1	59.55	75.19	48.21	–	12.55	15.49	27.97	34.48	32.08	26.2
C18:1 t	–	–	–	–	–	–	–	9.34	–	19.5
C18:2	7.00	3.09	1.29	–	7.36	14.62	12.37	4.97	9.08	–
C18:2 t	–	–	–	–	–	–	–	9.24	–	–
C18:3	11.20	5.20	1.54	33.00	13.54	20.24	–	–	8.11	12.8
C18:3 t	–	–	–	–	4.18	2.08	1.61	–	–	–
C20:0	–	–	3.57	–	–	–	–	0.21	–	–
C20:1	0.55	0.66	0.14	3.8	0.83	–	0.67	–	0.68	–
C20:4	0.92	0.57	–	–	–	–	–	–	–	–
C20:5	2.23	1.24	–	–	–	–	–	–	–	–
C22:0	–	–	0.12	–	–	–	–	0.65	0.16	–
C22:1	–	–	0.58	–	–	–	–	–	–	–
C22:6	3.88	2.26	–	–	–	–	–	–	–	–
SFA	11.69	10.60	26.27	nd	25.08	36.94	13.98	nd	nd	nd
MUFA	63.10	77.03	70.90	nd	22.69	26.56	28.43	nd	nd	nd
PUFA	25.21	12.37	2.83	nd	52.23	36.50	57.59	nd	nd	nd

*nd: belirlenmemiştir. ^{1,2}(Cabanelas vd., 2015), ³(Shu vd., 2013), ⁴(Xia vd., 2013), ⁵⁻⁷(Pinto vd., n.d.), ⁸(Taher vd., 2015), ⁹(S. H. Ho vd., 2010), ¹⁰(Toledo-Cervantes vd., 2013).

3. THY’NİN FONKSİYONEL ÖZELLİKLERİ

3.1. Gıda Endüstrisinde Fonksiyonel Yağlar

Gıda endüstrisinde, çoklu doymamış yağ asitleri (polyunsaturated fatty acids, PUFA) açısından zengin lipid bileşenlerine olan talep giderek artmaktadır. PUFA’lar, insan sağlığı açısından hayati öneme sahip biyomoleküller olup, özellikle ω-3 ve ω-6 serilerine ait linoleik asit (LA) ve alfa-linolenik asit (ALA) gibi esansiyel yağ asitleri vücut tarafından sentezlenemediğinden diyetle dışarıdan alınmaları gerekmektedir (Laoteng & Certik, 2010). Bu bileşikler,

hücre membranlarının fosfolipit yapısına entegre olarak hücresel bütünlüğün ve geçirgenliğin korunmasına katkı sağlarken; uzun zincirli türevleri olan araşidonik asit (ARA), eikosapentaenoik asit (EPA) ve dokosaheksaenoik asit (DHA), sinyal iletimi ve eikosanoidlerin (prostaglandinler, tromboksanlar, lökotrienler) biyosentezinde işlev görmektedir (Sakuradani vd., 2009). Bu metabolitler, başta kardiyovasküler sistem, bağışıklık sistemi ve sinir sistemi olmak üzere birçok fizyolojik sürecin düzenlenmesinde rol oynamaktadır (Shinmen vd., 1989; Ward & Singh, 2005)). Çoklu doymamış yağ asitlerine (PUFA) yönelik ilginin artmasıyla birlikte, bebek maması endüstrisinin küresel pazarı dikkate değer bir büyüme göstermiştir (Bélignon, Christophe, vd., 2016). İnsan sütünde doğal olarak bulunan PUFA'ların, bebeklerin sağlıklı gelişimini desteklemek amacıyla bebek mamalarına ilave edilmesi potansiyel yararlar sunmaktadır. Geleneksel PUFA kaynakları literatürde iyi tanımlanmış olmakla birlikte (Abedi & Sahari, 2014; Crauste vd., 2016; Ward & Singh, 2005) (Tablo 4), daha düşük maliyetli ve daha erişilebilir alternatif kaynaklara yönelik araştırmalar uzun yıllar önce başlamıştır. PUFA'lara yönelik ilginin artması, özellikle bebek maması sektöründe küresel ölçekte kayda değer bir büyümeyi beraberinde getirmiştir (Bélignon, Christophe, vd., 2016). İnsan sütünde doğal olarak bulunan PUFA'ların bebek mamalarına eklenmesi, bebeklerin sağlıklı gelişimi açısından önemli katkılar sunmaktadır. Geleneksel PUFA kaynakları detaylı biçimde tanımlanmış olmakla birlikte (Abedi & Sahari, 2014; Crauste vd., 2016; Ward & Singh, 2005), ekonomik ve sürdürülebilir alternatif kaynaklara yönelik araştırmalar uzun süredir devam etmektedir. Bu kapsamda, yüksek yağ içeriğine sahip mikroorganizmalar, uzun zincirli PUFA'ların biyosentezinde kullanılabilecek önemli biyolojik sistemler olarak değerlendirilmektedir.

Tablo 4. Fonksiyonel Lipit Kaynakları (Bélignon, Christophe, vd., 2016)

Yağ Asidi	PUFA	Kaynaklar
Omega-3	ALA	Bitkisel yağlar (keten tohumu yağı, chia tohumu yağı, kanola yağı, yumurta, et, ceviz, fındık) Yağlı balık yağları
	EPA	Yağlı balık yağları
	DHA	Yağlı balık yağları Anne sütü
Omega-6	LA	Bitkisel yağlar Kuruyemişler
	GLA	Çuha çiçeği yağı Hodan yağı
	ARA	Yumurta sarısı Hayvansal yağ Anne sütü

Yağlı mikroorganizmaların PUFA üretiminde umut vadeden adaylar olarak öne çıkmasının temel nedeni, bu bileşikleri doğal olarak sentezleme yetenekleridir. Ancak bu potansiyelin endüstriyel düzeye taşınabilmesi, ilgili mikroorganizmaların lipid metabolizması ve PUFA biyosentez yollarının ayrıntılı şekilde anlaşılmasını gerektirmektedir. 1980'li yılların sonlarından itibaren gerçekleştirilen bilimsel çalışmalar, DHA ve ARA'nın yenidoğanların sinir sistemi ve retina gelişiminde kritik roller üstlendiğini ortaya koymuştur (Ratledge, 2004). Klinik bulgular, bu yağ asitlerinin beyin korteksi ve retina gibi dokularda yoğun şekilde bulunduğunu ve dolayısıyla anne sütünde doğal olarak yer aldığını göstermektedir (Agostoni vd., 1995; Carlson vd., 1993). Buna karşılık, inek sütü ve bazı ticari bebek mamalarında DHA ve ARA'nın bulunmadığı ve bu durumun sinir sistemi gelişimini olumsuz yönde etkileyebileceği bildirilmektedir (Granot vd., 2016). Özellikle DHA eksikliğinin, görsel ve bilişsel gelişimde aksamalara neden olabileceği belirtilmiştir (Boswell vd., 1996; O'Brien & Sampson, 1965). Bu nedenle, DHA ve ARA'nın bebek mamalarına eklenmesi, nörogelişim ve bağışıklık sisteminin desteklenmesi açısından önemli bir uygulama hâline gelmiştir (Bellou vd., 2016). Geleneksel PUFA takviyesi genellikle balık yağlarından elde edilmekte olup, bu kaynakların bazı dezavantajları da söz konusudur. Balık yağları çevresel toksinler (örneğin dioksinler, PCB'ler ve ağır metaller) içerebildiğinden sağlık açısından risk oluşturabilmektedir (Bélignon vd., 2016). Ayrıca, DHA'nın balık yağlarında genellikle EPA ile birlikte bulunması, DHA'nın emilimini olumsuz etkileyebileceğinden, özellikle bebek beslenmesinde istenmeyen bir durum oluşturabilmektedir (Sinclair, 1998). Bu nedenlerle bazı ülkelerde, örneğin ABD'de, bebek ve küçük çocuklara yönelik balık yağı kullanımı yasaklanmıştır. Bu durum, güvenli ve sürdürülebilir PUFA kaynaklarının geliştirilmesini gerekli kılmıştır. Bu doğrultuda, yürütülen bazı çalışmalarda, bazı mikroalg türlerinin yüksek düzeyde DHA içerebildiğini ve bu organizmaların endüstriyel fermentasyon süreçlerinde başarıyla kullanılabileceğini ortaya koymuştur (Kyle & Ratledge, 1992). Benzer şekilde, ARA üretimi açısından *Mortierella alpina* gibi filamentli mantar türleri önemli mikrobiyal kaynaklar olarak öne çıkmaktadır (Ochsenreither vd., 2016).

Gıda ürünlerinin PUFA içeriğini artırmaya yönelik çeşitli stratejiler geliştirilmiştir. Bu stratejiler arasında, PUFA bakımından zengin yağların doğrudan gıdalara ilavesi, PUFA üreten mikroorganizmaların fonksiyonel gıda bileşeni olarak kullanılması ve PUFA içeren yemlerle beslenen hayvanlardan elde edilen hayvansal ürünlerin (et, süt, yumurta) değerlendirilmesi yer almaktadır (Bellou vd., 2016). Günümüz diyetlerinde ω -6 yağ asitlerinin aşırı, ω -3'lerin ise yetersiz düzeyde tüketildiği dikkate alındığında, bu stratejiler özellikle ω -3 bakımından zengin ürünlerin geliştirilmesinde büyük potansiyel taşımaktadır. İdeal omega-6/omega-3 oranının yaklaşık 4:1 olması gerektiği

önerilmekte olup (Simopoulos & DiNicolantonio, 2016), bu dengenin sağlanmasına yönelik girişimler hem halk sağlığı hem de gıda teknolojileri açısından önem arz etmektedir.

Günümüzde, DHA üretimi amacıyla farklı mikroorganizmalar kullanılarak en az üç farklı fermentasyon süreci geliştirilmiştir. ARA üretimi ise Avrupa, Çin ve Japonya gibi bölgelerde, çeşitli *M. alpina* suşları aracılığıyla yürütülen bağımsız üretim süreçleri ile sağlanmak la birlikte bu süreç hızla yayılmaktadır.

THY süreçlerinde kullanılan organizmaların tamamının, en az bir ana PUFA içeriği bakımından oldukça yüksek oranlara sahip olduğu vurgulanmaktadır. Örneğin, *Cryptocodinium cohnii*'nin, toplam yağ asitlerinin %40 ila %50'sine ulaşabilen DHA içeriği ile dikkat çektiği ve üretilen triasilgliserol yağında tek PUFA olarak bulunduğu belirlenmiştir. Bu yağda bulunan tek diğer doymamış yağ asidinin ise nispeten düşük oranda oleik asit (18:1) olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, mikrobiyal yağların benzersiz bir yapıya sahip olduğu ve hem doymuş hem de doymamış yağ asitlerinin bir aralığının bulunduğu bitkisel veya hayvansal yağlardan tamamen farklı olduğu belirtilmektedir. Eğer diyet gereksinimi yalnızca tek bir PUFA içermeliyse, bu gereksinimin yalnızca mikrobiyal yağlarla karşılanabileceği ifade edilmektedir.

Son 20 yıl içerisinde, THY'lerin akademik bir araştırma alanı olmaktan çıkarak, bebek beslenmesinde temel PUFA'ların başlıca kaynağı haline geldiği görülmektedir. Ayrıca, bu bileşenlerin yetişkinler için diyet takviyesi olarak kullanımına yönelik çalışmaların devam ettiği ve DHA açısından zengin yağların koroner kalp rahatsızlıklarının önlenmesine yardımcı olabileceği konusunda büyük bir ilgi bulunduğu belirtilmektedir. Ek olarak, DHA'nın Alzheimer hastalığı (Calon vd., 2004) gibi nörodejeneratif hastalıkların gelişimini önlemeye yardımcı olabileceği ve hatta çocuklarda dikkat eksikliği sendromunun tedavisinde yararlı olabileceği yönünde bazı öneriler sunulmuştur. Tüm bu durumlarda, ihtiyaç duyulan bileşenin yalnızca DHA içeren bir yağ olduğu ve bu nedenle mikrobiyal yağların en uygun kaynak olduğu vurgulanmaktadır.

3.2. Tek Hücre Yağlarının Antioksidan ve Antimikrobiyal Etkisi

Mikroalg biyokütlesi, içerdiği çeşitli antioksidan bileşiklerin sinerjik etkileşimi sayesinde, etkili ve çok bileşenli bir antioksidan sistem olarak değerlendirilmektedir (Sousa vd., 2008). Bu organizmalar, özellikle zengin vitamin içerikleriyle öne çıkmakta olup, sağlık açısından önem arz eden biyolojik aktif moleküllerin doğal kaynakları arasında yer almaktadır (Brown vd., 1999; Running vd., 2002). Mikroalgler, antioksidan özellik gösteren α - β -tokoferol ve α -tokotrienol gibi E vitamini izomerleri ile yağda çözünebilen fenolik bileşikleri biriktirme yetenekleri sayesinde dikkat çekmektedir. E vitamini, başta kanser ve kardiyovasküler hastalıklar olmak üzere; göz hastalıkları, Alzheimer ve

Parkinson gibi nörodejeneratif hastalıklara karşı koruyucu ve terapötik potansiyel taşımaktadır (Pham-Huy vd., 2008).

Hasat edilen mikroalgler; gıda endüstrisinde koruyucu ve sağlığı destekleyici katkı maddesi, kozmetik sektöründe ise fotoprotektif (ışık koruyucu) ajanlar olarak değerlendirilmektedir (Alberts vd., 1996). Örneğin, *Dunaliella tertiolecta* ve *Tetraselmis suecica* türlerinde azot sınırlaması altında gerçekleştirilen kültürleme koşulları, E vitamini üretiminde anlamlı artışa neden olmuştur (Carballo-Cárdenas vd., 2003; Durmaz, 2007). Benzer şekilde, *Euglena gracilis* türünün yüksek düzeyde α -tokoferol ($3,7 \pm 0,2$ mg/g) sentezleme kapasitesine sahip olduğu gösterilmiştir (Rodríguez-Zavala vd., 2010). Mikroalgler ayrıca, suda çözünebilir ve biyolojik açıdan önemli bir vitamin olan kobalamini (B12 vitamini) sentezleyebilen nadir organizmalar arasında yer almaktadır. Özellikle *Spirulina* türleri, hem bitkisel hem de hayvansal kaynaklara kıyasla daha yüksek B12 içeriği sunmaktadır. Buna ek olarak, antioksidan özelliklere sahip askorbik asit (C vitamini), çeşitli mikroalg türleri tarafından sentezlenebilmektedir. C vitamini, kolajen, karnitin ve nörotransmitterlerin biyosentezinde görev almakta; bağışıklık sisteminin modülasyonuna katkıda bulunmakta ve kanser ile ateroskleroz gibi hastalıkların önlenmesinde etkili olmaktadır. *Chlorella* ve *Dunaliella* türleri, yüksek C vitamini birikimi ile öne çıkmaktadır (Barbosa vd., 2005; Running vd., 2002). Bunların yanı sıra, lipofilik bir antioksidan olan butillenmiş hidroksitoluenin (BHT), *Botryococcus braunii* türü tarafından yüksek miktarda sentezlenebildiği bildirilmektedir. Bu özellik, söz konusu türün doğal antioksidan kaynağı olarak gıda katkı maddeleri ve diğer endüstriyel ürünlerde kullanım potansiyelini artırmaktadır (Capitani vd., 2009). Öte yandan, *Dunaliella* türlerinin yüksek düzeyde glutatyon (GSH) üretme kapasitesine sahip olduğu gösterilmiştir (Li vd., 2004; Sies, 1999). Protein yapısında olmayan bir tiyol bileşiği olan GSH, reaktif oksijen türlerini (ROS) nötralize etme ve oksidatif stres kaynaklı hücresel hasarı önlemede temel bir antioksidan rol üstlenmekte olup; ilaç, gıda ve kozmetik endüstrilerinde geniş bir uygulama alanı bulmaktadır.

3.3. Tek Hücre Yağlarının Kakao ve Palm Yağı İkamesi Olarak Kullanılma Potansiyeli

Son yıllarda gıda ve kozmetik endüstrilerinde kakao yağına (CB) olan talep giderek artmaktadır. Genellikle Afrika ve Orta Amerika ülkelerinde üretilen bu yağ, kakao çekirdeklerinin işlenmesi sırasında elde edilen değerli bir yan ürün olarak kabul edilmektedir (Papanikolaou & Aggelis, 2011; Patel vd., 2020). Kakao yağı, yüksek düzeyde doymuş yağ asitleri (%55–67) ve düşük düzeyde doymamış yağ asitleri (%2–4) içeren kendine özgü bir lipid profiline sahiptir. Bu profilin oluşumunda başlıca rol oynayan yağ asitleri arasında palmitik asit, stearik asit ve oleik asit yer almaktadır (Das, 2004; Papanikolaou & Aggelis, 2011; Patel vd., 2020). 2000’li yıllardan itibaren, kakao üretimini olumsuz etkileyen zararlı

böcekler ve viral hastalıkların yayılımı, kakao yağı üretiminde istikrarsızlıklara neden olmuş; bu durum, kakao yağı benzerlerine (CBS) olan talebin artmasına yol açmıştır (Papanikolaou & Aggelis, 2011b). Artan talep, alternatif yağ kaynaklarına yönelik ilgiyi artırmış ve bu yağların piyasa değerini önemli ölçüde yükseltmiştir. Bu bağlamda, kakao yağı ile benzer fizikokimyasal özelliklere sahip lipidlerin üretimi amacıyla çeşitli biyoteknolojik yaklaşımlar geliştirilmiştir.

1980'li yıllarda gündeme gelen enzimatik yöntemler, bitkisel yağların trans ve interesterifikasyonu yoluyla istenen triasilgliserol (TAG) profiline sahip ürünlerin elde edilmesini mümkün kılmıştır. Zamanla, düşük maliyetli yağ asitlerinin substrat olarak kullanılabilmesi, bu yöntemlerin endüstriyel ölçekte uygulanabilirliğini artırmıştır (Papanikolaou & Aggelis, 2011). Aynı dönemde, kakao yağı üretimindeki arz sıkıntıları, kakao yağına alternatif kaynakların araştırılmasına neden olmuş; bu çerçevede, kakao yağına benzer bileşime sahip tek hücre yağları (single cell oils, SCOs) dikkat çekmiştir (Ward & Singh, 2005). 1990'lı yıllardan itibaren yürütülen çeşitli çalışmalar, tek hücre yağlarının kakao yağına alternatif olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymuştur (Davies vd., 1990; Davies & Holdsworth, 1992; Ykema vd., 1990; Ykema, Verbree, vd., 1989). Özellikle *Yarrowia lipolytica* türü, kakao yağına benzer lipidleri sentezleme kapasitesiyle öne çıkmış; ayrıca, üretim maliyetinin tarımsal ve endüstriyel atıkların karbon kaynağı olarak değerlendirilmesiyle azaltılabileceği gösterilmiştir (Papanikolaou vd., 2001, 2003). Kakao yağı fiyatlarının arz yetersizliğine bağlı olarak yükselmesi, zeytinyağı veya palm yağı gibi bitkisel yağların lipaz yardımıyla transesterifikasyonu yoluyla CBS üretimine olan ilgiyi de artırmıştır (Ward & Singh, 2005). Bununla birlikte, konvansiyonel olmayan biyokatalitik yöntemlerin büyük ölçekli uygulamaları hâlen sınırlı kalmakta; buna karşılık, oleaginöz mikroorganizmalar aracılığıyla CBS üretimi endüstriyel düzeyde mümkün hale gelmiştir (Papanikolaou & Aggelis, 2011)

Palm yağı, düşük maliyeti ve işlevsel özellikleri nedeniyle gıda sektöründe yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak, çevresel sürdürülebilirlik ve sağlıkla ilgili endişeler, bu yağa alternatif arayışlarını hızlandırmıştır. Bu kapsamda, oleaginöz mikroorganizmalar tarafından sentezlenen mikrobiyal yağlar (SCOs), palm yağına yapısal ve işlevsel olarak benzer özellikler göstermeleri nedeniyle dikkat çekmektedir. Tek hücre yağları (THY'ler), palmitik, oleik ve linoleik asit gibi yaygın yağ asitlerini içerebilmekte olup, kültür koşullarına bağlı olarak bu yağ asidi profili istenen düzeye optimize edilebilmektedir. Bu esneklik, THY'leri palm yağı, palm olein, palm stearin ve palm çekirdeği yağı gibi çeşitli fraksiyonların yerine geçebilecek potansiyel alternatifler haline getirmektedir. Ayrıca, bu yağlar herhangi bir kimyasal modifikasyon veya yeniden formülasyona ihtiyaç duymaksızın gıda ürünlerine doğrudan entegre edilebilmektedir (Parsons vd., 2020). Ancak, ekonomik ve teknik bazı

sınırlamalar, THY'lerin ticari düzeyde yaygınlaştırılmasını engellemektedir. Fototrofik mikroalglerin düşük biyokütle verimi ve açık sistemlerde kontaminasyona yatkınlıkları; heterotrofik türlerin ise kapalı biyoreaktör sistemlerinde yüksek enerji ve sermaye maliyetlerine ihtiyaç duyması, başlıca kısıtlayıcı faktörler arasında yer almaktadır. Ayrıca, THY'lerin lipitleri hücre içi depolamaları, ekstraksiyon ve saflaştırma gibi ek işlemleri zorunlu kılmakta; bu da sürecin genel verimliliğini ve ekonomik uygulanabilirliğini azaltmaktadır.

Tüm bu sınırlamalara rağmen, tarım alanlarına bağımlı olmaksızın üretilen ve palm yağı ile yüksek düzeyde benzerlik gösteren tek hücre yağları, sürdürülebilir ve yenilikçi bir alternatif olarak önemini korumaktadır.

3.4. PUFA Stabilesi ve Teknolojik Yaklaşımlar

Poliansatüre yağ asitleri (PUFA'lar), oksidasyona karşı son derece hassas yapıları nedeniyle raf ömrü ve duysal kalite açısından çeşitli dezavantajlar taşımaktadır. Bu olumsuzlukların giderilmesi amacıyla, PUFA içeren ürünlerin oksidatif stabilesini artırmaya yönelik çeşitli teknolojik yaklaşımlar geliştirilmiştir. Mikroenkapsülasyon, emülsifikasyon ve antioksidan ilavesi gibi yöntemler, söz konusu ürünlerin raf ömrünün uzatılması ve kalite korunumu açısından etkili bulunmuştur (Kralovec vd., 2012; Shahidi & Zhong, 2010b, 2010a)

PUFA'lar yalnızca bebek mamalarında değil; aynı zamanda süt, yoğurt, et ürünleri (örneğin hindi köftesi ve sosis) ve kakao yağı alternatifleri gibi birçok farklı gıda matrisinde işlevsel bileşen olarak kullanılmaktadır. Ancak, kakao yağı fiyatlarında meydana gelen düşüş, bu tür ticari uygulamaların sürdürülebilirliğini ekonomik açıdan sınırlamıştır (Ganesan vd., 2014; Jiménez-Colmenero, 2007; Ratledge, 2001). Bebek mamalarının yanı sıra, sıvı süt ve yoğurt gibi süt ürünleri de keten tohumu, balık yağı veya deniz mikroalglerinden elde edilen ω -3 PUFA'lar ile zenginleştirilmektedir (Ganesan vd., 2014). Ayrıca, bitkisel ve denizel mikroalg kaynaklı yağlar, ω -3 PUFA içeriği artırılmış et ürünlerinin üretiminde de yaygın olarak kullanılmaktadır (Jiménez-Colmenero, 2007). Bu bağlamda, yosunlardan elde edilen et dışı yağlar kullanılarak formüle edilen ürün örnekleri arasında kıyılmış hindi köftesi, taze domuz sosisleri ve bazı sınırlı jambon türleri yer almaktadır (Lee vd., 2006). Bu tür yağlar, genellikle protein kaynağı olarak kullanılan peynir altı suyu protein izolatları ile birlikte yağ-su emülsiyonu formunda ürünlere dahil edilmiştir. Elde edilen emülsiyonlar, oksidatif stabilite açısından yüksek performans sergilemekte olup, pH 3,0 düzeyinde fiziksel stabiliteyi koruyabilmektedir (Djordjevic vd., 2004). Doymamış yağ asitleri, kimyasal yapıları gereği oksidatif bozunmaya yatkındır ve bu süreç sonucunda aldehit ve keton gibi hoş olmayan tat ve kokuya neden olan bileşikler oluşabilmektedir (Kralovec vd., 2012). Bu nedenle, PUFA'ların

stabilitesini artırmak amacıyla çeşitli antioksidan bileşiklerin kullanımı gündeme gelmiştir. Ancak, mevcut antioksidanlar birçok gıda matrisinde duyuusal stabiliteyi istenen düzeyde sağlayamamaktadır (Kralovec vd., 2012). Bu bağlamda, mikrokapsülleme teknolojisi, PUFA'ların oksidatif stabilitesinin artırılmasında öne çıkan bir strateji olarak değerlendirilmektedir. Bu yöntem yalnızca sıvı bileşenlerin katı hâle dönüştürülmesini değil, aynı zamanda bileşenlere işlevsellik kazandırılmasını ve oksidatif kararlılığın artırılmasını da sağlamaktadır (Kralovec vd., 2012).

Mikrobiyal kaynaklı tek hücre yağları (SCO), özellikle kakao yağı arzının yetersiz olduğu dönemlerde alternatif yağ kaynakları olarak gündeme gelmiş; bu doğrultudaki ilk çalışmalar 1980'li yıllarda başlatılmıştır (Ward & Singh, 2005). Bu kapsamda, *Cryptococcus curvatus* suşunda stearik asit (C18:0)'i oleik aside (C18:1, ω -9) dönüştüren Δ 9-desaturaz enziminin aktivitesi mutagenез yoluyla kısmen inhibe edilmiş ve böylece stearik asit düzeyinin artırılması hedeflenmiştir (Ward & Singh, 2005). Elde edilen yağın palmitik, stearik ve oleik asit oranları sırasıyla %24, %21 ve %30 (w/w) olup, bu kompozisyon kakao yağı ile yüksek düzeyde benzerlik göstermektedir (Davies, 1992; Moreton, 1988; Ratledge, 2001; Verwoert vd., 1989; Ward & Singh, 2005). Ancak, kakao yağı fiyatlarının 8000 \$/ton düzeyinden 2500 \$/tonun altına düşmesi, bu tür üretim süreçlerinin ekonomik rekabetçiliğini ciddi şekilde zayıflatmıştır (Ratledge, 2001; Ward & Singh, 2005; Wynn & Ratledge, 2006).

İşlevsel gıdaların tasarımında temel unsurlardan biri, sağlık faydası sağlayabilecek düzeyde aktif bileşenlerin üründe bulunmasını garanti etmektir. Ancak, güçlendirilmiş ürünlerin geliştirilmesinde temel kısıtlardan biri, önerilen günlük alım düzeylerine ulaşmak için bu ürünlerin büyük miktarlarda tüketilmesini gerektirmesidir (Garg vd., 2006; Jiménez-Colmenero, 2007). Örneğin, et dışı yağların kullanımı et ürünlerinin lipit profilinin iyileştirilmesini sağlasa da bu yağların ikame potansiyeli ürünün toplam yağ içeriğine bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Düşük yağ içeriğine sahip ürünlerde (<%10), katkı miktarı sınırlı kalmakta (≤ 5 g/100 g); buna karşılık, orta ve yüksek yağ içeren ürünlerde daha fazla miktarda hayvansal yağın ikame edilmesi mümkün olmakta ve böylece daha sağlıklı lipit profilleri elde edilebilmektedir (Jiménez-Colmenero, 2007).

Sonuç olarak, sağlık açısından potansiyel faydaların elde edilebilmesi için, ürünlerin yağ içeriği ve kompozisyonu yeniden yapılandırılmalı; bu bileşenlerin etkili dozlarda bulunmasını sağlayacak şekilde formüle edilmelidir. Ürünlerin işlevsel olarak kabul edilebilmesi, ancak önerilen besinsel ve fizyolojik etkileri destekleyecek düzeyde bilimsel olarak doğrulanmış aktif bileşen içeriği ile mümkündür (Jiménez-Colmenero, 2007).

3.5. Kozmetik Uygulamalarda PUFA Kullanımı ve Mikrobiyal Kaynaklar

Kozmetik ürünler; cilt veya saç üzerinde temizlik, güzelleştirme, bakım ya da iyileştirme amacıyla kullanılan, insan vücudu üzerinde hafif etki gösteren karışımlar, maddeler veya formülasyonlar olarak tanımlanmaktadır (Gagliardi & Dorato, 2007). 2020 yılı itibarıyla küresel kozmetik endüstrisinin piyasa değeri 19,38 milyar dolar olarak raporlanmış olup, tüketicilerin cilt bakımı ve güzellik ürünlerine yönelik artan ilgisi doğrultusunda sektör hızlı bir büyüme trendi sergilemektedir. Son yıllarda ise tüketiciler, kimyasal içerikli ürünlere kıyasla doğal ve cilt sağlığına yönelik fonksiyonel faydalar sunan bakım ürünlerine yönelme eğilimi göstermektedir (Ding vd., 2022).

Çoklu doymamış yağ asitleri (PUFA'lar), özellikle linoleik asit (LA) ve araşidonik asit (AA), epidermal su bariyerinin bütünlüğü ve cilt fizyolojisinin sürdürülebilirliği açısından kritik işlevlere sahiptir (Ziboh vd., 2000). Bu yağ asitlerinin eksikliği durumunda ciltte transepidermal su kaybı, kuruluk ve dermatit gibi rahatsızlıklar ortaya çıkabilmektedir (Ding vd., 2022). Bu nedenle PUFA'lar, nemlendirici, bariyer güçlendirici ve cilt yenileyici özellikleri sayesinde kozmetik ve dermokozmetik formülasyonlarda temel bileşenler arasında değerlendirilmektedir.

PUFA üretimi gerçekleştiren mikroorganizmalar genellikle ekstrem çevresel koşullarda yüksek basınç, düşük sıcaklık ve derin deniz habitatları gibi yaşamlarını sürdüren türlerdir (Elrazak vd., 2013). Deniz mikroalgleri arasında yer alan *Tetraselmis suecica*, *Porphyridium cruentum* ve *Chaetoceros calcitrans* türleri, yüksek düzeyde LA ve AA içeren lipid üretim potansiyelleri ile dikkat çekmektedir (Kim vd., 2008). Bu mikroalgler, sürdürülebilir PUFA kaynakları olarak kozmetik sektöründe değerlendirilmeye uygundur.

Her ne kadar genetik mühendislik yöntemleri ile yüksek verimli yağ asidi üretimi üzerine önemli araştırmalar yürütülmüş olsa da tüketici tercihlerinde genetiği değiştirilmemiş ve doğal yollarla PUFA üreten mikroorganizmaların daha ön planda olduğu görülmektedir. Bu durum, doğal biyoteknolojik kaynakların kozmetik endüstrisinde kullanımını desteklemektedir (Elrazak vd., 2013).

3.6. Mikrobiyal Yağlardan Türetilen Biyosüpfaktanlar ve Biyoemülgatörler

Biyosüpfaktanlar, mikroorganizmalar tarafından sentezlenen, düşük moleküler ağırlıklı, amfifilik yapıda ve yüksek yüzey aktifliğe sahip bileşiklerdir. Bu bileşikler, farklı polariteye sahip mikrobiyal lipid sınıflarının kullanımıyla elde edilebilmekte ve biyolojik kökenli yüzey aktif ajanlar olarak tanımlanmaktadır

(Chattopadhyay & Maiti, 2021). Biyosüpfaktanların ticari uygulama alanı oldukça geniş olup; sabun, deterjan ve diğér kişisel bakım ürünlerinin yanı sıra, biyoremediasyon, antimikrobiyal formülasyonlar ve ilaç taşıyıcı sistemler gibi çevresel ve biyomedikal alanları da kapsamaktadır (Develter & Lauryssen, 2010; Joshi-Navare vd., 2013; Rahman vd., 2002).

Mikrobiyal yağlar, sabunlaştırma yöntemiyle sabun üretiminde kullanılabilirdiğı gibi, aynı zamanda lipopeptit, glikolipid ve benzeri biyosüpfaktan bileşiklerine biyoteknolojik dönüşüm yoluyla da değérlendirilebilmektedir (Nunes vd., 2024). Bu yönüyle, mikrobiyal yağlar sürdürülebilir ve işlevsel biyoaktif moleküllerin üretiminde önemli bir hammadde olarak öne çıkmaktadır.

Biyosüpfaktanlara benzer şekilde, biyoemülgatörler de mikrobiyal kaynaklı bileşikler olup, emülsiyon stabilizasyonu amacıyla kullanılmaktadır (Alizadeh-Sani vd., 2018). Bu bileşikler her ne kadar doğrudan mikrobiyal yağlardan türetilmese de bazı oleaginöz maya türleri azot sınırlı ortam koşullarında hücre dışı biyoemülgatör üretme kapasitesine sahiptir. Bu koşullar aynı zamanda lipit birikimini de teşvik etmekte olup, mikrobiyal üretim süreçlerinde çift amaçlı bir avantaj sağlamaktadır. Bu tür yağlı maya suşları arasında *Yarrowia lipolytica*, *Candida tropicalis* ve *Rhodotorula* spp. gibi mikroorganizmalar öne çıkmaktadır (Calvo vd., 2004; Johnson vd., 1992).

3.7. Mikrobiyal Yağların Biyodizel Üretiminde Kullanımı ve Sürdürülebilirliğin Değérlendirilmesi

Yağ asidi metil veya etil esterleri, yani biyodizel, geleneksel olarak bitkisel yağlar veya hayvansal lipitler kullanılarak üretilmektedir. Ancak bu kaynaklar, gıda üretimiyle rekabet etmeleri ve geniş tarım alanı gereksinimleri nedeniyle uzun vadede sürdürülebilir değildir (IEA, 2006). Bu bağlamda, mikroorganizmalardan elde edilen yağlar, biyodizel üretimi için umut verici bir alternatif olarak değérlendirilmektedir (Ochsenreither vd., 2016).

Mikroorganizmaların kısa yaşam döngüsüne sahip olmaları ve üretim süreçlerinin mekân, mevsim ya da iklim gibi dış faktörlerden büyük ölçüde bağımsız gerçekleşebilmesi, mikrobiyal yağ üretimini avantajlı kılmaktadır (Thiru vd., 2011). Son yıllarda yapılan çalışmalar, yağlı mayalar gibi mikroorganizmaların palmitik, oleik, stearik ve linoleik asit içeren lipitler üretebildiğini göstermiştir. Bu yağ asitleri, bileşim açısından bitkisel yağlara benzerlik göstermekte ve biyodizel üretimi için uygun bir profil sunmaktadır (Nigam & Singh, 2011; Zhu vd., 2010).

Mikrobiyal yağların büyük ölçekli üretimi, tarımsal monokültürlerin oluşturduğu çevresel baskıları azaltmakta, toprak tükenmesini engellemekte ve bitki bazlı enerji hammaddeleriyle rekabeti ortadan kaldırmaktadır (Ratledge &

Cohen, 2008). Ayrıca, mikroalgler kısa sürede yüksek miktarda lipid, karbonhidrat ve protein üretebilmekte olup, bu özellikleri sayesinde sadece biyoyakıt değil, aynı zamanda çeşitli değerli yan ürünlerin üretimi açısından da önemli potansiyele sahiptir (Nigam & Singh, 2011).

Ancak, biyodizel üretimi bağlamında mikrobiyal yağların ekonomik uygulanabilirliği halen önemli kısıtlamalarla karşı karşıyadır. Yüksek üretim maliyetleri, özellikle de biyoreaktör sistemlerinin işletilmesine ilişkin giderler, bu teknolojinin ticari ölçekte uygulanmasını sınırlamaktadır (Nigam & Singh, 2011). Dahası, fosil yakıtların hâlâ daha düşük maliyetli olması, SCO kaynaklı biyodizel üretiminin ekonomik olarak rekabetçi olmasını engellemektedir.

Sonuç olarak, mikrobiyal yağlardan biyodizel üretimi teknik olarak mümkün olsa da, günümüz ekonomik koşullarında bu uygulama henüz sürdürülebilir ve uygulanabilir bir seçenek olarak değerlendirilememektedir. Bu nedenle, mikrobiyal yağların biyodizel dışında daha katma değerli ürünlerde değerlendirilmesi, mevcut koşullar altında daha stratejik bir yaklaşım sunmaktadır.

3.8. PUFA'ların Sağlık Açısından Önemi ve Tıbbi Uygulamaları

Dokosaheksaenoik asit (DHA) ve eikosapentaenoik asit (EPA), çoklu doymamış yağ asitleri (PUFA) grubunda yer almakta olup insan sağlığı üzerinde çeşitli olumlu etkileri ile dikkat çekmektedir (Covington, 2004). DHA ve EPA'nın; yaşa bağlı makula dejenerasyonuna bağlı görme kaybı riskini azalttığı (L. Ho vd., 2011), damar sertliğini önleyici özellik taşıdığı (Pase vd., 2011), anksiyete ve inflamasyonu hafifletici etkiler gösterdiği (Kiecolt-Glaser vd., 2011) ve anneler tarafından tüketildiğinde bebeklerde soğuk algınlığına karşı koruyucu etki sağladığı bildirilmektedir (Imhoff-Kunsch vd., 2011). Bu yağ asitleri ayrıca kalp ve beyin sağlığını desteklemekte; astım, romatoid artrit, şizofreni, depresyon, multipl skleroz ve migren gibi çeşitli hastalıkların tedavisinde potansiyel faydalar sunmaktadır (Gray, 2011). Özellikle düşük DHA düzeylerinin intihar riski ile ilişkili olabileceği de literatürde belirtilmiştir (Lewis vd., 2011).

DHA ve EPA dışında, gama-linolenik asit (GLA) gibi diğer PUFA'ların da sağlık üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. GLA'nın özellikle seçici antikanser etkiler gösterdiği raporlanmış (Kenny vd., 2000) ve bu nedenle çeşitli mikroorganizmalarla üretimi üzerine araştırmalar yapılmıştır. Literatürde, GLA'nın bazı oleaginöz mikroorganizmalarda birikebildiği gösterilmiştir. Bu mikroorganizmalar arasında *Cunninghamella echinulata* (Fakas vd., 2007), *Mortierella isabellina* (Papanikolaou vd., 2004), *Mortierella ramanniana* (Dyal vd., 2005), *Mortierella alpine* (Jang vd., 2005) ve *Mucor rouxii* (Mamatha vd., 2008) yer almaktadır.

DHA, EPA ve araşidonik asit (ARA) gibi PUFA'lar, bebek beyninin gelişimi, görme fonksiyonlarının düzenlenmesi, hormon ve sinyal moleküllerinin sentezi ile kardiyovasküler sistem üzerinde gösterdikleri olumlu etkiler nedeniyle insan sağlığı açısından kritik öneme sahiptir (Meyer vd., 2003; Sakuradani & Shimizu, 2003; SanGiovanni & Chew, 2005).

4. MİKROBİYAL YAĞ ÜRETİMİNDE EKONOMİK DEĞERLENDİRME

Mikrobiyal yağlar, sürdürülebilirlik ve çevresel kaygılar doğrultusunda alternatif yağ kaynakları arasında giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bununla birlikte, mikrobiyal yağların potansiyel endüstriyel üretimi için dikkate alınması gereken önemli faktörlerden biri toplam üretim maliyetidir. Bu bağlamda, substrat maliyetleri, üretim süreçlerinin verimliliği, ürünün piyasa değeri ve yan ürünlerin değerlendirilme potansiyeli gibi faktörler ön plana çıkmaktadır. Bu maliyetler, kakao yağının piyasa fiyatı, kullanılan substratların maliyeti, fermentasyon sonrası işlem ve THY'nin saflaştırılması gibi unsurları kapsamaktadır (Papanikolaou & Aggelis, 2010). Örneğin, Kakao yağı ikamelerinin geniş ölçekli üretimi, yalnızca kakao yağının fiyatının 8 ABD \$/kg seviyesinin üzerinde olması ve çok düşük ya da negatif değere sahip karbon kaynaklarının substrat olarak kullanılması durumunda ekonomik açıdan uygulanabilir hale gelmektedir. Başka bir örnekte, donyağı (tallow) şu anda yaklaşık 0,3–0,4 ABD \$/kg iken, kanola yağı 1,4–1,5 ABD \$/kg fiyat aralığındadır. Son yıllarda, biyodizel üretiminin artmasıyla birlikte, başlangıçta düşük katma değerli olarak kabul edilen bitkisel yağların fiyatlarında (örneğin kanola ve ayçiçek yağları) önemli bir artış gözlemlenmiştir. 2007–2008 yılları arasında, bu bitkisel yağların fiyatları neredeyse iki katına çıkmıştır (Ratledge & Cohen, 2008).

Bu bağlamda, *Y. lipolytica* ile yürütülen yağ biyomodifikasyon süreçlerinde, düşük ya da negatif değerli substratlar örneğin kızartmalarda kullanılmış atık bitkisel yağlar D9-18:1 yağ asidi vericisi olarak değerlendirilmelidir. Bu kapsamda endüstriyel gliserol de alternatif bir ko-substrat olarak kullanılmıştır. Gliserol, biyodizel üretiminin başlıca yan ürünüdür ve maliyeti çok düşük olup genellikle 0–0,05 ABD \$/kg arasında değişmektedir (Papanikolaou vd., 2003). Her ne kadar CHRO gibi substratlarla karşılaştırıldığında gliserolün kullanımı sonucu elde edilen THY'nin yağ asidi kompozisyonu kakao yağına daha az benzerlik gösterse de gliserolün düşük maliyeti bu yöntemin potansiyelini ortaya koymaktadır.

Benzer şekilde, 18:0 yağ asidi vericisi olarak donyağı yerine atık hayvansal yağlar da kullanılabilir (Bednarski vd., 1994; Desphande & Daniels, 1995). Gıda endüstrisinde toksik olmayan bu atıkların bertaraf edilme maliyeti 0,4–0,7 ABD

\$/kg olup, bu atıkların kakao yağı benzeri lipit üretiminde değerlendirilmesi hem ekonomik hem çevresel açıdan önemlidir. 2008 yılında maya kökenli THY'nin kilogram başı değeri yaklaşık 3 ABD doları olarak bildirilmiştir (substrat ve ekstraksiyon maliyeti hariç)(Ratlledge & Cohen, 2008).

Fermantasyon ve saflaştırma süreçleri de toplam maliyet üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Üretim sürecinin enerji gereksinimleri, kullanılan biyoreaktör sistemlerinin ölçeği ve proses optimizasyonu, maliyetin düşürülmesinde belirleyici faktörlerdir. Yüksek yoğunluklu kültür sistemlerinin ve düşük enerjili ekstraksiyon tekniklerinin geliştirilmesi, bu maliyetlerin azaltılmasına katkı sağlayabilir.

Ayrıca, mikrobiyal yağ üretiminin çok amaçlı ürünler için kullanımı, ekonomik uygulanabilirliği artırmaktadır. Tek hücreli yağlar yalnızca biyoyakıt üretiminde değil; aynı zamanda kozmetik, ilaç, gıda ve yem endüstrilerinde de kullanılabilen, böylece yüksek katma değerli yan ürünler ile ekonomik geri dönüş sağlanabilmektedir (Nigam & Singh, 2011). Özellikle PUFA içeriği yüksek olan yağların sağlık ve fonksiyonel gıda alanlarında kullanımı, mikrobiyal yağların pazarlanabilirliğini artırmaktadır.

5. SONUÇ

Mikrobiyal yağ üretimi, artan beslenme taleplerine yönelik sürdürülebilir ve rasyonel bir çözüm sunmaktadır. Çoklu doymamış yağ asitleri (PUFA) üretimi, günümüzde endüstriyel ölçeklerde mikrobiyal suşlar aracılığıyla gerçekleştirilen yaygın bir uygulama haline gelmiştir. Bebek maması pazarı yaklaşık 11,5 milyar dolar büyüklüğe ulaşmış olup, bu pazar büyüme eğilimini sürdürmektedir. Omega-3 ve omega-6 yağ asitlerinin yenidoğanlardan yaşlı bireylere kadar geniş yaş gruplarında sağlık açısından önemli faydalar sağladığı bilimsel olarak kabul görmektedir (Bélignon, Christophe ve ark., 2016). Günümüzde belirli PUFA türleri, araşidonik asit (ARA) ve dokosaheksaenoik asit (DHA) gibi, ticari düzeyde farklı mikroorganizmalar tarafından üretilmekte ve özellikle bebek mamaları ile diyet takviyelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Birçok firma, tek hücreli yağlar (THY) içeren PUFA'ların araştırma, geliştirme, üretim ve pazarlamasına yönelik faaliyetlerini sürdürmektedir.

Mikrobiyal üretim kapasitesine ilişkin derinlemesine bilgi birikimi, mikrobiyal lipitlerin endüstriyel ölçekte sentezlenmesine olanak tanımaktadır. Son dönemlerde, genetiği değiştirilmiş organizmaların (GDO) geliştirilmesiyle daha yüksek verim ve seçici PUFA üretimi sağlayan rekombinant suşlar üzerinde yoğunlaşan çalışmalar artış göstermiştir. Bununla birlikte, üretim süreçlerinde düşük maliyetli ve yenilenebilir substratların kullanımı, çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik öneme sahiptir. Organik atıklar, mikroorganizma büyümesini destekleyen uygun substratlar olarak değerlendirilmektedir ve yapılan çalışmalar,

belirli mikroorganizmaların bu atıkları biyolojik olarak PUFA'lara dönüştürebildiğini göstermektedir. Atık ve yan ürünlerin değerlendirilmesi, sürdürülebilirliği artırmanın yanı sıra, biyo-rafineri yaklaşımı doğrultusunda nihai ürün maliyetlerinin azaltılmasına da katkı sağlamaktadır.

Sonuç olarak, mevcut mikroorganizma çeşitliliği, metabolik yollara ilişkin kapsamlı bilgiler, düşük maliyetli substratların etkin kullanımı ve üretim süreçlerindeki yan ürünlerin geri dönüşüm potansiyeli, tek hücreli yağların diyet takviyesi amaçlı üretiminin geliştirilmesinde önemli avantajlar sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- Abedi, E., & Sahari, M. A. (2014). Long-chain polyunsaturated fatty acid sources and evaluation of their nutritional and functional properties. In *Food Science and Nutrition* (Vol. 2, Issue 5). <https://doi.org/10.1002/fsn3.121>
- Aggelis, G., Stathas, D., Tavoularis, N., Komaitis, M., Composition of lipids produced by some strains of *Candida* species. Production of single-cell oil in a chemostat culture. *Folia Microbiol.* 1996, 41, 299–302.
- Agostoni, C., Riva, E., Trojan, S., Bellù, R., & Giovannini, M. (1995). Docosahexaenoic acid status and developmental quotient of healthy term infants. *The Lancet*, 346(8975), 638.
- Akoh, C. C. (2005). Handbook of Functional Lipids. In *Handbook of Functional Lipids*. <https://doi.org/10.1201/9781420039184>
- Alberts, D. S., Goldman, R., Xu, M., Dorr, R. T., Quinn, J., Welch, K., Guillen-Rodriguez, J., Aickin, M., Peng, Y., & Loeschner, L. (1996). *Disposition and metabolism of topically administered α -tocopherol acetate: A common ingredient of commercially available sunscreens and cosmetics.*
- Alizadeh-Sani, M., Hamishehkar, H., Khezerlou, A., Azizi-Lalabadi, M., Azadi, Y., Nattagh-Eshtivani, E., Fasihi, M., Ghavami, A., Aynehchi, A., & Ehsani, A. (2018). Bioemulsifiers derived from microorganisms: applications in the drug and food industry. *Advanced Pharmaceutical Bulletin*, 8(2), 191.
- Andre', A., Chatzifragkou, A., Diamantopoulou, P., Sarris, D., vd., Biotechnological conversions of bio-diesel derived crude glycerol by *Yarrowia lipolytica* strains. *Eng. Life Sci.* 2009, 9, 468–478.
- Angerbauer, C., Siebenhofer, M., Mittelbach, M., Guebitz, G. M., Conversion of sewage sludge into lipids by *Lipomyces starkeyi* for biodiesel production. *Bioresour. Technol.* 2008, 99, 3051–3056.
- Barbosa, M. J., Zijffers, J. W., Nisworo, A., Vaes, W., Van Schoonhoven, J., & Wijffels, R. H. (2005). Optimization of biomass, vitamins, and carotenoid yield on light energy in a flat-panel reactor using the A-stat technique. *Biotechnology and Bioengineering*, 89(2), 233–242.
- Bélignon, V., Christophe, G., Fontanille, P., & Larroche, C. (2016). Microbial lipids as potential source to food supplements. In *Current Opinion in Food Science* (Vol. 7, pp. 35–42). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2015.10.002>
- Bélignon, V., Molina, G., Christophe, G., Larroche, C., Lebert, A., & Fontanille, P. (2016). Microbial single-cell oils: precursors of biofuels and dietary supplements. In *Biotechnological Production Of Natural Ingredients For Food Industry* (pp. 322–375). Bentham Science Publishers.

- Bellou, S., Triantaphyllidou, I. E., Mizerakis, P., & Aggelis, G. (2016). High lipid accumulation in *Yarrowia lipolytica* cultivated under double limitation of nitrogen and magnesium. *Journal of Biotechnology*, 234, 116–126. <https://doi.org/10.1016/J.JBIOTEC.2016.08.001>
- Beopoulos, A., Mrozova, Z., Thevenieau, F., Le Dall, M. T., Hapala, I., Papanikolaou, S., Chardot, T., & Nicaud, J. M. (2008). Control of lipid accumulation in the yeast *Yarrowia lipolytica*. *Applied and Environmental Microbiology*, 74(24). <https://doi.org/10.1128/AEM.01412-08>
- Bharathiraja, B., Sridharan, S., Sowmya, V., Yuvaraj, D., & Praveenkumar, R. (2017). Microbial oil – A plausible alternate resource for food and fuel application. *Bioresource Technology*, 233, 423–432. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2017.03.006>
- Boswell, K., Koskelo, E. K., Carl, L., Glaza, S., Hensen, D. J., Williams, K. D., & Kyle, D. J. (1996). Preclinical evaluation of single-cell oils that are highly enriched with arachidonic acid and docosahexaenoic acid. *Food and Chemical Toxicology*, 34(7), 585–593. [https://doi.org/10.1016/0278-6915\(96\)00019-1](https://doi.org/10.1016/0278-6915(96)00019-1)
- Botham, P. A., & Ratledge, C. (1979). A biochemical explanation for lipid accumulation in *Candida* 107 and other oleaginous micro-organisms. *Journal of General Microbiology*, 114(2). <https://doi.org/10.1099/00221287-114-2-361>
- Brown, M. R., Mular, M., Miller, I., Farmer, C., & Trenerry, C. (1999). The vitamin content of microalgae used in aquaculture. *Journal of Applied Phycology*, 11, 247–255.
- Cabanelas, I. T. D., Marques, S. S. I., de Souza, C. O., Druzian, J. I., & Nascimento, I. A. (2015). Botryococcus, what to do with it? Effect of nutrient concentration on biorefinery potential. *Algal Research*, 11, 43–49. <https://doi.org/10.1016/J.ALGAL.2015.05.009>
- Calon, F., Lim, G. P., Yang, F., Morihara, T., Teter, B., Ubeda, O., Rostaing, P., Triller, A., Salem, N., Ashe, K. H., Frautschy, S. A., & Cole, G. M. (2004). Docosahexaenoic acid protects from dendritic pathology in an Alzheimer's disease mouse model. *Neuron*, 43(5). <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2004.08.013>
- Calvo, C., Toledo, F. L., Pozo, C., Martínez-Toledo, M. V., & González-López, J. (2004). Biotechnology of bioemulsifiers produced by micro-organisms. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 2(3), 238–243.
- Capitani, C. D., Carvalho, A. C. L., Rivelli, D. P., Barros, S. B. M., & Castro, I. A. (2009). Evaluation of natural and synthetic compounds according to their

antioxidant activity using a multivariate approach. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 111(11), 1090–1099.

- Carballo-Cárdenas, E. C., Tuan, P. M., Janssen, M., & Wijffels, R. H. (2003). Vitamin E (α -tocopherol) production by the marine microalgae *Dunaliella tertiolecta* and *Tetraselmis suecica* in batch cultivation. *Biomolecular Engineering*, 20(4–6), 139–147. [https://doi.org/10.1016/S1389-0344\(03\)00040-6](https://doi.org/10.1016/S1389-0344(03)00040-6)
- Carlson, S. E., Werkman, S. H., Rhodes, P. G., & Tolley, E. A. (1993). Visual-acuity development in healthy preterm infants: Effect of marine-oil supplementation. *American Journal of Clinical Nutrition*, 58(1). <https://doi.org/10.1093/ajcn/58.1.35>
- Čertík, M., Baltészová, L., & Šajbidor, J. (1997). Lipid formation and γ -linolenic acid production by *Mucorales* fungi grown on sunflower oil. *Letters in Applied Microbiology*, 25(2). <https://doi.org/10.1046/j.1472-765X.1997.00173.x>
- Chang, G., Gao, N., Tian, G., Wu, Q., Chang, M., & Wang, X. (2013). Improvement of docosahexaenoic acid production on glycerol by *Schizochytrium* sp. S31 with constantly high oxygen transfer coefficient. *Bioresource Technology*, 142. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.04.107>
- Chang, G., Luo, Z., Gu, S., Wu, Q., Chang, M., & Wang, X. (2013). Fatty acid shifts and metabolic activity changes of *Schizochytrium* sp. S31 cultured on glycerol. *Bioresource Technology*, 142, 255–260. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2013.05.030>
- Chattopadhyay, A., & Maiti, M. K. (2021). Lipid production by oleaginous yeasts. *Advances in Applied Microbiology*, 116, 1–98. <https://doi.org/10.1016/BS.AAMBS.2021.03.003>
- Chatzifragkou, A., Makri, A., Belka, A., Bellou, S., vd., Biotechnological conversions of biodiesel derived waste glycerol by yeast and fungal species. *Energy* 2011, 36, 1097–1108.
- Cheirsilp, B., & Louhasakul, Y. (2013). Industrial wastes as a promising renewable source for production of microbial lipid and direct transesterification of the lipid into biodiesel. *Bioresource Technology*, 142. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.05.012>
- Chen, B. Y., Lee, C. H., Chang, J. S., & Hsueh, C. C. (2015). Impedance fingerprint selection of DHA-producing photoautotrophic microalgae. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 57. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2015.05.016>
- Cheng, M. H., Walker, T. H., Hulbert, G. J., & Raman, D. R. (1999). Fungal production of eicosapentaenoic and arachidonic acids from industrial waste

- streams and crude soybean oil. *Bioresource Technology*, 67(2), 101–110. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(98\)00113-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(98)00113-8)
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25(3), 294–306. <https://doi.org/10.1016/J.BIOTECHADV.2007.02.001>
- Choi, S. Y., Ryu, D. Y., Rhee, J. S., Effects of growth rate and oxygen on lipid synthesis and fatty acid composition of *Rhodotorula gracilis*. *Biotechnol. Bioeng.* 1982, 14, 1165– 1172.
- Covington, M. B. (2004). Omega-3 fatty acids. *American Family Physician*, 70(1), 133–140.
- Crauste, C., Rosell, M., Durand, T., & Vercauteren, J. (2016). Omega-3 polyunsaturated lipophenols, how and why? In *Biochimie* (Vol. 120). <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2015.07.018>
- Darcan, S., & Sarıgül, N. (2016). Single Cell oil Production from Microorganisms. *Türk Mikrobiyoloji Cemiyeti Dergisi*.
- Das, U. N. (2004). From bench to the clinic: γ -linolenic acid therapy of human gliomas. *Prostaglandins, Leukotrienes and Essential Fatty Acids*, 70(6), 539–552. <https://doi.org/10.1016/J.PLEFA.2003.12.001>
- Davies, R. J. (1988). Yeast oil from cheese whey-process development. *Single Cell Oil*, 99–145.
- Davies, R. J. (1992). Scale up of yeast oil technology. *Industrial Applications of Single Cell Oils*, 196–218.
- Davies, R. J., & Holdsworth, J. E. (1992). Synthesis of lipids in yeasts: biochemistry, physiology and production. *Adv. Appl. Lipid Res*, 1(11).
- Davies, R. J., Holdsworth, J. E., & Reader, S. L. (1990). The effect of low oxygen uptake rate on the fatty acid profile of the oleaginous yeast *Apiotrichum curvatum*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 33, 569–573.
- Davies, R. J., Yeast oil from cheese whey – process development, in: Moreton, R. S. (Ed.), *Single Cell Oil*, Longman Scientific & Technical, Harlow (UK) 1988, pp. 99–146.
- Denli, Y., & Tekin, A. (2000). Yağ üretimi ve mikroorganizmalar. *Gıda*, 25(4).
- Develter, D. W. G., & Lauryssen, L. M. L. (2010). Properties and industrial applications of sophorolipids. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 112(6), 628–638.
- Dick, M. W. (2001). The Peronosporomycetes. In D. J. McLaughlin, E. G. McLaughlin, & P. A. Lemke (Eds.), *Systematics and Evolution: Part A* (pp.

39–72). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-10376-0_2

- Ding, J., Wu, B., & Chen, L. (2022). Application of marine microbial natural products in cosmetics. *Frontiers in Microbiology*, 13, 892505.
- Djordjevic, D., McClements, D. J., & Decker, E. A. (2004). Oxidative stability of whey protein-stabilized oil-in-water emulsions at pH 3: Potential ω -3 fatty acid delivery systems (Part B). *Journal of Food Science*, 69(5), C356–C362.
- Durmaz, Y. (2007). Vitamin E (α -tocopherol) production by the marine microalgae *Nannochloropsis oculata* (Eustigmatophyceae) in nitrogen limitation. *Aquaculture*, 272(1–4), 717–722. <https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2007.07.213>
- Dyal, S. D., Bouzidi, L., & Narine, S. S. (2005). Maximizing the production of γ -linolenic acid in *Mortierella ramanniana* var. *ramanniana* as a function of pH, temperature and carbon source, nitrogen source, metal ions and oil supplementation. *Food Research International*, 38(7), 815–829. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2005.04.002>
- Evans, C. T., & Ratledge, C. (1983). A comparison of the oleaginous yeast, *Candida curvata*, grown on different carbon sources in continuous and batch culture. *Lipids*, 18(9). <https://doi.org/10.1007/BF02534673>
- Evans, C. T., Ratledge, C., A comparison of the oleaginous yeast *Candida curvata*, grown on different carbon sources in continuous and batch culture. *Lipids* 1983, 18, 623–629.
- Fakas, S., Galiotou-Panayotou, M., Papanikolaou, S., Komaitis, M., & Aggelis, G. (2007). Compositional shifts in lipid fractions during lipid turnover in *Cunninghamella echinulata*. *Enzyme and Microbial Technology*, 40(5), 1321–1327. <https://doi.org/10.1016/J.ENZMICTEC.2006.10.005>
- Fakas, S., Papanikolaou, S., Batsos, A., Galiotou-Panayotou, M., Mallouchos, A., & Aggelis, G. (2009). Evaluating renewable carbon sources as substrates for single cell oil production by *Cunninghamella echinulata* and *Mortierella isabellina*. *Biomass and Bioenergy*, 33(4), 573–580. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.09.006>
- Fakas, S., Papanikolaou, S., Galiotou-Panayotou, M., Komaitis, M., & Aggelis, G. (2008). Organic nitrogen of tomato waste hydrolysate enhances glucose uptake and lipid accumulation in *Cunninghamella echinulata*. *Journal of Applied Microbiology*, 105(4). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2008.03839.x>

- Fakas, S., Papanikolaou, S., Galiotou-Panayotou, M., Komaitis, M., & Aggelis, G. (2009). *Biochemistry and biotechnology of single cell oil*. Asiatech Publishers.
- Ferreira, G. F., Ríos Pinto, L. F., Maciel Filho, R., & Fregolente, L. V. (2019). A review on lipid production from microalgae: Association between cultivation using waste streams and fatty acid profiles. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 109, pp. 448–466). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.052>
- Finco, A. M. de O., Mamani, L. D. G., Carvalho, J. C. de, de Melo Pereira, G. V., Thomaz-Soccol, V., & Soccol, C. R. (2017). Technological trends and market perspectives for production of microbial oils rich in omega-3. In *Critical Reviews in Biotechnology* (Vol. 37, Issue 5). <https://doi.org/10.1080/07388551.2016.1213221>
- Gagliardi, L., & Dorato, S. (2007). General Concepts. Current Legislation on Cosmetics in Different Countries. *Analysis of Cosmetic Products*, 3–28. <https://doi.org/10.1016/B978-044452260-3/50024-3>
- Ganesan, B., Brothersen, C., & McMahon, D. J. (2014). Fortification of foods with omega-3 polyunsaturated fatty acids. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 54(1), 98–114.
- Gao, D., Zeng, J., Zheng, Y., Yu, X., & Chen, S. (2013). Microbial lipid production from xylose by *Mortierella isabellina*. *Bioresource Technology*, 133. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.01.132>
- Garg, M. L., Wood, L. G., Singh, H., & Moughan, P. J. (2006). Means of delivering recommended levels of long chain n-3 polyunsaturated fatty acids in human diets. *Journal of Food Science*, 71(5), R66–R71.
- Gill, C., Hall, M., Ratledge, C., Lipid accumulation in an oleaginous yeast (*Candida* 107) growing on glucose in single-stage continuous culture. *Appl. Environ. Microbiol.* 1977, 33, 231–239.
- Gorissen, L., De Vuyst, L., Raes, K., De Smet, S., & Leroy, F. (2012). Conjugated linoleic and linolenic acid production kinetics by bifidobacteria differ among strains. *International Journal of Food Microbiology*, 155(3). <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2012.02.012>
- Granot, E., Ishay-Gigi, K., Malaach, L., & Flidel-Rimon, O. (2016). Is there a difference in breast milk fatty acid composition of mothers of preterm and term infants? *Journal of Maternal-Fetal and Neonatal Medicine*, 29(5). <https://doi.org/10.3109/14767058.2015.1020785>
- Gray, N. (2011). *Beyond the heart and brain: emerging benefits of omega-3*. NutraIngredients-USA.

- Guedes, A. C., Amaro, H. M., Barbosa, C. R., Pereira, R. D., & Malcata, F. X. (2011). Fatty acid composition of several wild microalgae and cyanobacteria, with a focus on eicosapentaenoic, docosahexaenoic and α -linolenic acids for eventual dietary uses. *Food Research International*, 44(9). <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.05.020>
- Guschina, I. A., & Harwood, J. L. (2006). Lipids and lipid metabolism in eukaryotic algae. In *Progress in Lipid Research* (Vol. 45, Issue 2). <https://doi.org/10.1016/j.plipres.2006.01.001>
- Hansson, L., Dosta'lek, M., Influence of cultivation conditions on lipid production by *Cryptococcus albidus*. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 1986, 24, 12–18.
- Hassan, M., Blanc, P. J., Granger, L. M., Pareilleux, A., Goma, G., Lipid production by an unsaturated fatty acid auxotroph of the oleaginous yeast *Apiotrichum curvatum* grown in single-stage continuous culture. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 1993, 40, 483–488.
- Hassan, M., Blanc, P. J., Pareilleux, A., Goma, G., Selection of fatty acid auxotrophs from the oleaginous yeast *Cryptococcus curvatus* and production of cocoa-butter equivalents in batch mode. *Biotechnol. Lett.* 1994, 16, 819– 824.
- Ho, L., van Leeuwen, R., Witteman, J. C. M., van Duijn, C. M., Uitterlinden, A. G., Hofman, A., de Jong, P. T. V. M., Vingerling, J. R., & Klaver, C. C. W. (2011). Reducing the Genetic Risk of Age-Related Macular Degeneration With Dietary Antioxidants, Zinc, and ω -3 Fatty Acids: The Rotterdam Study. *Archives of Ophthalmology*, 129(6), 758–766. <https://doi.org/10.1001/archophthalmol.2011.141>
- Ho, S. H., Chen, W. M., & Chang, J. S. (2010). *Scenedesmus obliquus* CNW-N as a potential candidate for CO₂ mitigation and biodiesel production. *Bioresource Technology*, 101(22), 8725–8730. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2010.06.112>
- Hu, C., Zhao, X., Zhao, J., Wu, S., Zhao, Z. B., Effects of biomass hydrolysis by-products on oleaginous yeast *Rhodospiridium toruloides*. *Bioresour. Technol.* 2009, 100, 4843–4847.
- Huang, T. Y., Lu, W. C., & Chu, I. M. (2012). A fermentation strategy for producing docosahexaenoic acid in *Aurantiochytrium limacinum* SR21 and increasing C22:6 proportions in total fatty acid. *Bioresource Technology*, 123, 8–14. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2012.07.068>
- Imhoff-Kunsch, B., Stein, A. D., Martorell, R., Parra-Cabrera, S., Romieu, I., & Ramakrishnan, U. (2011). Prenatal Docosahexaenoic Acid Supplementation and Infant Morbidity: Randomized Controlled Trial. *Pediatrics*, 128(3), e505–e512. <https://doi.org/10.1542/peds.2010-1386>

- Jang, H. Der, & Yang, S. S. (2008). Polyunsaturated fatty acids production with a solid-state column reactor. *Bioresource Technology*, 99(14), 6181–6189. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2007.12.024>
- Jang, H. Der, Lin, Y. Y., & Yang, S. S. (2005). Effect of culture media and conditions on polyunsaturated fatty acids production by *Mortierella alpina*. *Bioresource Technology*, 96(15), 1633–1644. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2004.12.027>
- Ji, X. J., Zhang, A. H., Nie, Z. K., Wu, W. J., Ren, L. J., & Huang, H. (2014). Efficient arachidonic acid-rich oil production by *Mortierella alpina* through a repeated fed-batch fermentation strategy. *Bioresource Technology*, 170, 356–360. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2014.07.098>
- Jiménez-Colmenero, F. (2007). Healthier lipid formulation approaches in meat-based functional foods. Technological options for replacement of meat fats by non-meat fats. *Trends in Food Science & Technology*, 18(11), 567–578. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2007.05.006>
- Johnson, V., Singh, M., Saini, V. S., Adhikari, D. K., Sista, V., & Yadav, N. K. (1992). Bioemulsifier production by an oleaginous yeast *Rhodotorula glutinis* IIP-30. *Biotechnology Letters*, 14, 487–490.
- Joshi-Navare, K., Khanvilkar, P., & Prabhune, A. (2013). Jatropha oil derived sophorolipids: production and characterization as laundry detergent additive. *Biochemistry Research International*, 2013(1), 169797.
- Kanat, T. 2013. "Oleaginous mikroorganizmalarda mikrobiyal lipid üretimi" (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Kenny, F. S., Pinder, S. E., Ellis, I. O., Gee, J. M. W., Nicholson, R. I., Bryce, R. P., & Robertson, J. F. R. (2000). Gamma linolenic acid with tamoxifen as primary therapy in breast cancer. *International Journal of Cancer*, 85(5). [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0215\(20000301\)85:5<643::AID-IJC8>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0215(20000301)85:5<643::AID-IJC8>3.0.CO;2-Z)
- Kiecolt-Glaser, J. K., Belury, M. A., Andridge, R., Malarkey, W. B., & Glaser, R. (2011). Omega-3 supplementation lowers inflammation and anxiety in medical students: A randomized controlled trial. *Brain, Behavior, and Immunity*, 25(8), 1725–1734. <https://doi.org/10.1016/J.BBI.2011.07.229>
- Kim, S.-K., Ravichandran, Y. D., Khan, S. B., & Kim, Y. T. (2008). Prospective of the cosmeceuticals derived from marine organisms. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 13, 511–523.
- Koreti, D., Kosre, A., Jadhav, S. K., & Chandrawanshi, N. K. (2022). A comprehensive review on oleaginous bacteria: an alternative source for biodiesel production. In *Bioresources and Bioprocessing* (Vol. 9, Issue 1).

Springer Science and Business Media Deutschland GmbH.
<https://doi.org/10.1186/s40643-022-00527-1>

- Kralovec, J. A., Zhang, S., Zhang, W., & Barrow, C. J. (2012). A review of the progress in enzymatic concentration and microencapsulation of omega-3 rich oil from fish and microbial sources. *Food Chemistry*, 131(2), 639–644. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2011.08.085>
- Kyle, D. J., & Ratledge, C. (1992). *Industrial applications of single cell oils*. AOCS Publishing.
- Laoteng, K., & Certik, M. (2010). Biotechnological production and application of high-value microbial oils. In *Industrial Fermentation: Food Processes, Nutrient Sources and Production Strategies*.
- Lee Chang, K. J., Paul, H., Nichols, P. D., Koutoulis, A., & Blackburn, S. I. (2015a). Australian thraustochytrids: Potential production of dietary long-chain omega-3 oils using crude glycerol. *Journal of Functional Foods*, 19, 810–820. <https://doi.org/10.1016/J.JFF.2015.01.039>
- Lee Chang, K. J., Paul, H., Nichols, P. D., Koutoulis, A., & Blackburn, S. I. (2015b). Australian thraustochytrids: Potential production of dietary long-chain omega-3 oils using crude glycerol. *Journal of Functional Foods*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.01.039>
- Lee, S., Faustman, C., Djordjevic, D., Faraji, H., & Decker, E. A. (2006). Effect of antioxidants on stabilization of meat products fortified with n – 3 fatty acids. *Meat Science*, 72(1), 18–24. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2005.05.022>
- Leman, J. (1997). Oleaginous Microorganisms: An Assessment of the Potential. *Advances in Applied Microbiology*, 43, 195–243. [https://doi.org/10.1016/S0065-2164\(08\)70226-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2164(08)70226-0)
- Lewis, M. D., Hibbeln, J. R., Johnson, J. E., Lin, Y. H., Hyun, D. Y., & Loewke, J. D. (2011). Suicide deaths of active-duty US military and omega-3 fatty-acid status: A case-control comparison. *Journal of Clinical Psychiatry*, 72(12). <https://doi.org/10.4088/JCP.11m06879>
- Li, Y. H., Zhao, Z. B., Bai, F. W., High density cultivation of oleaginous yeast *Rhodospiridium toruloides* Y4 in fed-batch culture. *Enzyme Microb. Technol.* 2007, 41, 312–317.
- Li, Y., Han, D., Yoon, K., Zhu, S., Sommerfeld, M., & Hu, Q. (2013). Molecular and Cellular Mechanisms for Lipid Synthesis and Accumulation in Microalgae: Biotechnological Implications. In *Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology: Second Edition*. <https://doi.org/10.1002/9781118567166.ch28>

- Li, Y., Wei, G., & Chen, J. (2004). Glutathione: a review on biotechnological production. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 66, 233–242.
- Li, Y., Zhao, Z. (Kent), & Bai, F. (2007). High-density cultivation of oleaginous yeast *Rhodospiridium toruloides* Y4 in fed-batch culture. *Enzyme and Microbial Technology*, 41(3), 312–317. <https://doi.org/10.1016/J.ENZMICTEC.2007.02.008>
- Ling, X., Guo, J., Liu, X., Zhang, X., Wang, N., Lu, Y., & Ng, I. S. (2015a). Impact of carbon and nitrogen feeding strategy on high production of biomass and docosahexaenoic acid (DHA) by *Schizochytrium* sp. LU310. *Bioresource Technology*, 184, 139–147. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2014.09.130>
- Ling, X., Guo, J., Liu, X., Zhang, X., Wang, N., Lu, Y., & Ng, I. S. (2015b). Impact of carbon and nitrogen feeding strategy on high production of biomass and docosahexaenoic acid (DHA) by *Schizochytrium* sp. LU310. *Bioresource Technology*, 184. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.130>
- Makri, A., Fakas, S., Aggelis, G., Metabolic activities of biotechnological interest in *Yarrowia lipolytica* grown on glycerol in repeated batch cultures. *Bioresour. Technol.* 2010, 101, 2351–2358.
- Mamatha, S. S., Ravi, R., & Venkateswaran, G. (2008). Medium optimization of gamma linolenic acid production in *Mucor rouxii* CFR -G15 using RSM. *Food and Bioprocess Technology*, 1(4), 405–409. <https://doi.org/10.1007/s11947-008-0103-9>
- Meesters, P. A. E. P., Huijberts, G. N. M., Eggink, G., High cell density cultivation of the lipid accumulating yeast *Cryptococcus curvatus* using glycerol as a carbon source. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 1996, 45, 575–579.
- Meng, X., Yang, J., Xu, X., Zhang, L., Nie, Q., & Xian, M. (2009). Biodiesel production from oleaginous microorganisms. *Renewable Energy*, 34(1), 1–5. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2008.04.014>
- Meyer, A., Cirpus, P., Ott, C., Schlecker, R., Zähringer, U., & Heinz, E. (2003). Biosynthesis of docosahexaenoic acid in *Euglena gracilis*: Biochemical and molecular evidence for the involvement of a $\Delta 4$ -fatty acyl group desaturase. *Biochemistry*, 42(32), 9779–9788. <https://doi.org/10.1021/bi034731y>
- Moreton, R. S. (1985). Modification of fatty acid composition of lipid accumulating yeasts with cyclopropene fatty acid desaturase inhibitors. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 22(1). <https://doi.org/10.1007/BF00252154>
- Moreton, R. S. (1988). Physiology of lipid accumulating yeasts. *Single Cell Oil*, 1–32.

- Morgunov, I. G., Solodovnikova, N. Y., Sharyshev, A. A., Kamzolova, S. V., & Finogenova, T. V. (2004). Regulation of NAD⁺-Dependent isocitrate dehydrogenase in the citrate producing yeast *Yarrowia lipolytica*. *Biochemistry (Moscow)*, 69(12). <https://doi.org/10.1007/s10541-005-0086-3>
- Nakahara, T., Yokochi, T., Kamisaka, Y., & Suzuki, O. (1992). Gamma-Linolenic Acid from Genus *Mortierella*. In *Industrial Applications of Single Cell Oils*. <https://doi.org/10.1201/9781439821855.ch5>
- Nigam, P. S., & Singh, A. (2011). *Production of liquid biofuels from renewable resources*. *Prog Energ Combust* 37 (1): 52–68.
- Nunes, D. D., Pillay, V. L., Van Rensburg, E., & Pott, R. W. M. (2024). Oleaginous microorganisms as a sustainable oil source with a focus on downstream processing and cost-lowering production strategies: A review. In *Bioresource Technology Reports* (Vol. 26). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101871>
- Nzayisenga, J. C., Farge, X., Groll, S. L., & Sellstedt, A. (2020). Effects of light intensity on growth and lipid production in microalgae grown in wastewater. *Biotechnology for Biofuels*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/s13068-019-1646-x>
- O'Brien, J. S., & Sampson, E. L. (1965). Fatty acid and fatty aldehyde composition of the major brain lipids in normal human gray matter, white matter, and myelin. *Journal of Lipid Research*, 6(4). [https://doi.org/10.1016/s0022-2275\(20\)39620-6](https://doi.org/10.1016/s0022-2275(20)39620-6)
- Ochsenreither, K., Glück, C., Stressler, T., Fischer, L., & Syldatk, C. (2016). Production strategies and applications of microbial single cell oils. In *Frontiers in Microbiology* (Vol. 7, Issue OCT). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01539>
- Papanikolaou, S., & Aggelis, G. (2010). *Yarrowia lipolytica*: A model microorganism used for the production of tailor-made lipids. In *European Journal of Lipid Science and Technology* (Vol. 112, Issue 6, pp. 639–654). <https://doi.org/10.1002/ejlt.200900197>
- Papanikolaou, S., & Aggelis, G. (2011). Lipids of oleaginous yeasts. Part I: Biochemistry of single cell oil production. In *European Journal of Lipid Science and Technology* (Vol. 113, Issue 8, pp. 1031–1051). <https://doi.org/10.1002/ejlt.201100014>
- Papanikolaou, S., Aggelis, G., Lipid production by *Yarrowia lipolytica* growing on industrial glycerol in a single-stage continuous culture. *Bioresour. Technol.* 2002, 82, 43–49.

- Papanikolaou, S., Chevalot, I., Komaitis, M., Aggelis, G., & Marc, I. (2001). Kinetic profile of the cellular lipid composition in an oleaginous *Yarrowia lipolytica* capable of producing a cocoa-butter substitute from industrial fats. In *Antonie van Leeuwenhoek* (Vol. 80).
- Papanikolaou, S., Komaitis, M., & Aggelis, G. (2004). Single cell oil (SCO) production by *Mortierella isabellina* grown on high-sugar content media. *Bioresource Technology*, 95(3), 287–291. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2004.02.016>
- Papanikolaou, S., Muniglia, L., Chevalot, I., Aggelis, G., & Marc, I. (2003). Accumulation of a cocoa-butter-like lipid by *Yarrowia lipolytica* cultivated on agro-industrial residues. *Current Microbiology*, 46(2), 124–130. <https://doi.org/10.1007/s00284-002-3833-3>
- Parsons, S., Raikova, S., & Chuck, C. J. (2020). The viability and desirability of replacing palm oil. *Nature Sustainability*, 3(6), 412–418. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0487-8>
- Patel, A., Karageorgou, D., Rova, E., Katapodis, P., Rova, U., Christakopoulos, P., & Matsakas, L. (2020). An overview of potential oleaginous microorganisms and their role in biodiesel and omega-3 fatty acid-based industries. In *Microorganisms* (Vol. 8, Issue 3). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8030434>
- Patil, K. P., & Gogate, P. R. (2015). Improved synthesis of docosahexaenoic acid (DHA) using *Schizochytrium limacinum* SR21 and sustainable media. *Chemical Engineering Journal*, 268, 187–196. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2015.01.050>
- Pham-Huy, L. A., He, H., & Pham-Huy, C. (2008). Free radicals, antioxidants in disease and health. *International Journal of Biomedical Science: IJBS*, 4(2), 89.
- Pinto, L. F. R., de Almeida, V. F., Maciel, M. R. W., & Maciel Filho, R. (n.d.). *ESTUDO DA EXTRAÇÃO DE LIPÍDIOS EM TRES CEPAS DE MICROALGA*.
- Polakowski, T., Bastl, R., Stahl, U., & Lang, C. (1999). Enhanced sterol-acyl transferase activity promotes sterol accumulation in *Saccharomyces cerevisiae*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 53(1). <https://doi.org/10.1007/s002530051610>
- Raatz, S. K., Silverstein, J. T., Jahns, L., & Picklo, M. J., Sr. (2013). Issues of Fish Consumption for Cardiovascular Di-sease Risk Reduction. *Nutrients*, 5(4), 1081–1097. <https://doi.org/10.3390/nu5041081>

- Rahman, K. S. M., Rahman, T. J., McClean, S., Marchant, R., & Banat, I. M. (2002). Rhamnolipid biosurfactant production by strains of *Pseudomonas aeruginosa* using low-cost raw materials. *Biotechnology Progress*, 18(6), 1277–1281.
- Ratledge, C. (1991). Microorganisms for lipids. *Acta Biotechnologica*, 11(5), 429–438.
- Ratledge, C. (2001). Microbial lipids. *Biotechnology Set*, 133–197.
- Ratledge, C. (2004). Fatty acid biosynthesis in microorganisms being used for Single Cell Oil production. In *Biochimie* (Vol. 86, Issue 11, pp. 807–815). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2004.09.017>
- Ratledge, C., & Cohen, Z. (2008). Microbial and algal oils: Do they have a future for biodiesel or as commodity oils? *Lipid Technology*, 20(7). <https://doi.org/10.1002/lite.200800044>
- Ratledge, C., Bowater, M. D. V., & Taylor, P. N. (1997). Correlation of ATP/citrate lyase activity with lipid accumulation in developing seeds of *Brassica napus* L. *Lipids*, 32(1). <https://doi.org/10.1007/s11745-997-0002-7>
- Rodríguez-Zavala, J. S., Ortiz-Cruz, M. A., Mendoza-Hernández, G., & Moreno-Sánchez, R. (2010). Increased synthesis of α -tocopherol, paramylon and tyrosine by *Euglena gracilis* under conditions of high biomass production. *Journal of Applied Microbiology*, 109(6), 2160–2172.
- Running, J. A., Severson, D. K., & Schneider, K. J. (2002). Extracellular production of L-ascorbic acid by *Chlorella protothecoides*, *Prototheca* species, and mutants of *P. moriformis* during aerobic culturing at low pH. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 29(2), 93–98.
- Sakuradani, E., & Shimizu, S. (2003). Gene cloning and functional analysis of a second $\Delta 6$ -fatty acid desaturase from an arachidonic acid-producing *Mortierella* fungus. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*, 67(4), 704–711. <https://doi.org/10.1271/bbb.67.704>
- Sakuradani, E., Ando, A., Ogawa, J., & Shimizu, S. (2009). Improved production of various polyunsaturated fatty acids through filamentous fungus *Mortierella alpina* breeding. In *Applied Microbiology and Biotechnology* (Vol. 84, Issue 1). <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2076-7>
- SanGiovanni, J. P., & Chew, E. Y. (2005). The role of omega-3 long-chain polyunsaturated fatty acids in health and disease of the retina. *Progress in Retinal and Eye Research*, 24(1), 87–138. <https://doi.org/10.1016/J.PRETEYERES.2004.06.002>
- Shahidi, F., & Zhong, Y. (2010a). Lipid oxidation and improving the oxidative stability. *Chemical Society Reviews*, 39(11), 4067–4079.

- Shahidi, F., & Zhong, Y. (2010b). Novel antioxidants in food quality preservation and health promotion. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 112(9), 930–940. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201000044>
- Shaw, R. (1966). The fatty acids of phycomycete fungi, and the significance of the γ -linolenic acid component. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 18(2), 325–331. [https://doi.org/10.1016/0010-406X\(66\)90190-3](https://doi.org/10.1016/0010-406X(66)90190-3)
- Shen, H., Gong, Z., Yang, X., Jin, G., Bai, F., & Zhao, Z. K. (2013). Kinetics of continuous cultivation of the oleaginous yeast *Rhodospiridium toruloides*. *Journal of Biotechnology*, 168(1). <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2013.08.010>
- Shinmen, Y., Shimizu, S., Akimoto, K., Kawashima, H., & Yamada, H. (1989). Production of arachidonic acid by *Mortierella* fungi - Selection of a potent producer and optimization of culture conditions for large-scale production. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 31(1). <https://doi.org/10.1007/BF00252518>
- Shu, C. H., Tsai, C. C., Chen, K. Y., Liao, W. H., & Huang, H. C. (2013). Enhancing high quality oil accumulation and carbon dioxide fixation by a mixed culture of *Chlorella* sp. and *Saccharomyces cerevisiae*. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 44(6), 936–942. <https://doi.org/10.1016/J.JTICE.2013.04.001>
- Sies, H. (1999). Glutathione and its role in cellular functions. *Free Radical Biology and Medicine*, 27(9–10), 916–921. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(99\)00177-X](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(99)00177-X)
- Simopoulos, A. P., & DiNicolantonio, J. J. (2016). *The importance of a balanced ω -6 to ω -3 ratio in the prevention and management of obesity* (Vol. 3, Issue 2). British Cardiovascular Society.
- Sinclair, A. J. (1998). *Lipids in infant nutrition*. The American Oil Chemists Society.
- Singh, S., Pandey, D., Saravanabhupathy, S., Daveray, A., Dutta, K., & Arunachalam, K. (2022). Liquid wastes as a renewable feedstock for yeast biodiesel production: Opportunities and challenges. *Environmental Research*, 207, 112100. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2021.112100>
- Sousa, I., Gouveia, L., Batista, A. P., Raymundo, A., & Bandarra, N. M. (2008). Microalgae in novel food products. *Food Chemistry Research Developments*, 75–112.
- Sun, L., Ren, L., Zhuang, X., Ji, X., Yan, J., & Huang, H. (2014). Differential effects of nutrient limitations on biochemical constituents and docosahexaenoic acid production of *Schizochytrium* sp. *Bioresource Technology*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.02.106>

- Taher, H., Al-Zuhair, S., Al-Marzouqi, A., Haik, Y., & Farid, M. (2015). Growth of microalgae using CO₂ enriched air for biodiesel production in supercritical CO₂. *Renewable Energy*, 82, 61–70. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2014.08.013>
- Tai, M., & Stephanopoulos, G. (2013). Engineering the push and pull of lipid biosynthesis in oleaginous yeast *Yarrowia lipolytica* for biofuel production. *Metabolic Engineering*, 15(1). <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2012.08.007>
- Thiru, M., Sankh, S., & Rangaswamy, V. (2011). Process for biodiesel production from *Cryptococcus curvatus*. *Bioresource Technology*, 102(22), 10436–10440. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2011.08.102>
- Toledo-Cervantes, A., Morales, M., Novelo, E., & Revah, S. (2013). Carbon dioxide fixation and lipid storage by *Scenedesmus obtusiusculus*. *Bioresource Technology*, 130, 652–658. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2012.12.081>
- Vela Gurovic, M. S., Gentili, A. R., Olivera, N. L., & Rodríguez, M. S. (2014). Lactic acid bacteria isolated from fish gut produce conjugated linoleic acid without the addition of exogenous substrate. *Process Biochemistry*, 49(7). <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2014.04.004>
- Verwoert, I. I. G. S., Ykema, A., Valkenburg, J. A. C., Verbree, E. C., John, H., Nijkamp, J., & Smit, H. (1989). Modification of the fatty-acid composition in lipids of the oleaginous yeast *Apiotrichum curvatum* by intraspecific spheroplast fusion. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 32, 327–333.
- Ward, O. P., & Singh, A. (2005). Omega-3/6 fatty acids: Alternative sources of production. *Process Biochemistry*, 40(12). <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.02.020>
- Winwood, R. J. (2013). Recent developments in the commercial production of DHA and EPA rich oils from micro-algae. *OCL - Oilseeds and Fats, Crops and Lipids*, 20(6). <https://doi.org/10.1051/ocl/2013030>
- Wu, H., Li, Y., Chen, L., Zong, M. H., Production of microbial oil with high oleic acid content by *Trichosporon capitatum*. *Appl. Energy* 2011, 88, 138–142.
- Wu, S. T., Yu, S. T., & Lin, L. P. (2005). Effect of culture conditions on docosahexaenoic acid production by *Schizochytrium* sp. S31. *Process Biochemistry*, 40(9), 3103–3108. <https://doi.org/10.1016/J.PROCBIO.2005.03.007>
- Wu, S., Hu, C., Jin, C., Zhao, X., Zhao, Z. B., Phosphatelimitation mediated lipid production by *Rhodospiridium toruloides*. *Bioresour. Technol.* 2010, 101, 6124–6129.

- Wu, S., Zhao, X., Shen, H., Wang, Q., Zhao, Z. B., Microbial lipid production by *Rhodospiridium toruloides* under sulfate-limited conditions. *Bioresour. Technol.* 2011, 102, 1803–1807.
- Wynn, J. P., & Ratledge, C. (2006). Microbial production of oils and fats. *FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY-NEW YORK-MARCEL DEKKER-*, 148, 443.
- Xia, J., Gong, S., Jin, X., Wan, M., & Nie, Z. (2013). Effects of simulated flue gases on growth and lipid production of *Chlorella sorokiniana* CS-01. *Journal of Central South University*, 20(3), 730–736.
- Xing, D., Wang, H., Pan, A., Wang, J., & Xue, D. (2012). Assimilation of corn fiber hydrolysates and lipid accumulation by *Mortierella isabellina*. *Biomass and Bioenergy*, 39. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.01.024>
- Yang, X., Jin, G., Gong, Z., Shen, H., Bai, F., & Zhao, Z. K. (2015). Recycling microbial lipid production wastes to cultivate oleaginous yeasts. *Bioresource Technology*, 175, 91–96. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2014.10.020>
- Ykema, A., Kater, M. M., & Smit, H. (1989). Lipid production in wheypermeate by an unsaturated fatty acid mutant of the oleaginous yeast *Apiotrichum curvatum*. *Biotechnology Letters*, 11, 477–482.
- Ykema, A., Verbree, E. C., Nijkamp, H. J. J., & Smit, H. (1989). Isolation and characterization of fatty acid auxotrophs from the oleaginous yeast *Apiotrichum curvatum*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 32, 76–84.
- Ykema, A., Verbree, E. C., Verwoert, I. I. G. S., van der Linden, K. H., Nijkamp, H. J. J., & Smit, H. (1990). Lipid production of revertants of Ufa mutants from the oleaginous yeast *Apiotrichum curvatum*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 33, 176–182.
- Yücel, E., Kamer, DDA., Gümüş, T. 2024. Tek Hücre Yağı Üretimi. In İ. Yılmaz, *Gıda Mühendisliğinde Yeni Yaklaşımlar (s25-43)*. İksad Publishing House.
- Zeng, J., Zheng, Y., Yu, X., Yu, L., Gao, D., & Chen, S. (2013). Lignocellulosic biomass as a carbohydrate source for lipid production by *Mortierella isabellina*. *Bioresource Technology*, 128, 385–391. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2012.10.079>
- Zhang, L., Zhao, H., Lai, Y., Wu, J., & Chen, H. (2013). Improving docosaheaxaenoic acid productivity of *Schizochytrium* sp. by a two-stage AEMR/shake mixed culture mode. *Bioresource Technology*, 142, 719–722. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2013.05.072>
- Zhao, X., Hu, C., Wu, S., Shen, H., & Zhao, Z. K. (2011). Lipid production by *Rhodospiridium toruloides* Y4 using different substrate feeding strategies.

Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, 38(5).
<https://doi.org/10.1007/s10295-010-0808-4>

Zhao, X., Kong, X., Hua, Y., Feng, B., Zhao, Z. B., Medium optimization for lipid production through co-fermentation of glucose and xylose by the oleaginous yeast *Lipomyces starkeyi*. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.* 2008, 110, 405–412.

Zhu, Q., Xue, Z., Yadav, N., Damude, H., Pollak, D. W., Rupert, R., Seip, J., Hollerbach, D., Macool, D., Zhang, H., Bledsoe, S., Short, D., Tyreus, B., Kinney, A., & Picataggio, S. (2010). Metabolic Engineering of an Oleaginous Yeast for the Production of Omega-3 Fatty Acids. *Single Cell Oils: Microbial and Algal Oils: Second Edition*, 51–73.
<https://doi.org/10.1016/B978-1-893997-73-8.50007-4>

Ziboh, V. A., Miller, C. C., & Cho, Y. (2000). Metabolism of polyunsaturated fatty acids by skin epidermal enzymes: generation of antiinflammatory and antiproliferative metabolites. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 71(1), 361S-366S. <https://doi.org/10.1093/AJCN/71.1.361S>

Zinjarde, S. S. (2014). Food-related applications of *Yarrowia lipolytica*. In *Food Chemistry* (Vol. 152). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.11.117>



BÖLÜM 7

Sürdürülebilir Bölgesel Kalkınma Hedefleri Çerçevesinde Kentsel Dönüşüm Stratejileri ve Depreme Dayanıklı Kent Ekonomisi: Yalova Örneği

Çiğdem Avcı Karataş¹

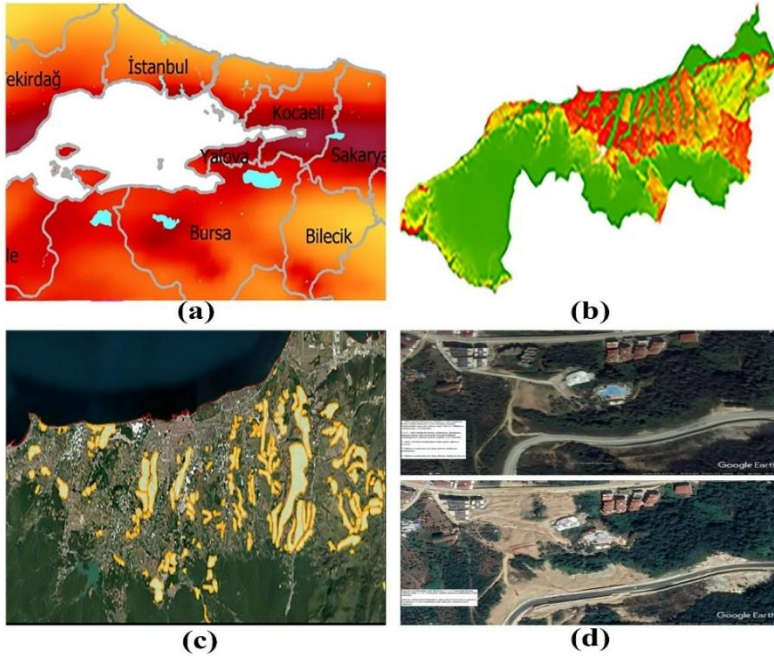
1. GİRİŞ

Türkiye, jeolojik konumu nedeniyle dünyanın en yüksek deprem riskine sahip ülkelerinden biridir. Özellikle 1999 Marmara Depremi, kentsel dönüşüm kavramını Türkiye'nin gündemine kalıcı biçimde yerleştirmiş, deprem riskine duyarlı kentleşme politikalarının aciliyetini ortaya koymuştur. Bu tarihten sonra kentsel dönüşüm, yalnızca fiziksel yapıların yenilenmesi değil; aynı zamanda toplumsal dayanıklılığın artırılması, sürdürülebilir kent ekonomisinin geliştirilmesi ve çevresel değerlerin korunması gibi çok boyutlu hedeflere yönelmiştir (Keleş, 2025; Özdemir, 2010). Türkiye'de kentsel dönüşüm uygulamaları, 2000'li yılların başından itibaren yasal düzenlemelerle kurumsallaşmış; özellikle 6306 sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Kanunu (2012) ile kapsamlı bir mevzuat altyapısı oluşturulmuştur. Bu yasal çerçeve, riskli yapıların ve alanların dönüştürülmesini zorunlu kılarken, aynı zamanda ekonomik, sosyal ve çevresel sürdürülebilirlik hedefleriyle entegrasyonu öngörmektedir. Kuzey Anadolu Fay Hattı üzerinde yer alan Yalova, Türkiye'nin en yüksek deprem riski taşıyan bölgelerinden biridir. 1999 Marmara Depremi'nde ağır hasar gören kent, bu tarihten itibaren hem akademik literatürde hem de kamu politikalarında depreme duyarlı kentsel dönüşümün odak noktalarından biri haline gelmiştir (BAP, 2024). Yalova'da mevcut yapı stokunun önemli bir kısmı 1999 öncesinde inşa edilmiş olup, bu yapıların deprem dayanıklılığı yetersizdir. Ayrıca ilin hızlı göç alması, plansız kentleşme ve altyapı eksikliklerini derinleştirmiştir. Bu durum, sürdürülebilir kentsel dönüşüm stratejilerinin geliştirilmesini ve uygulanmasını kritik bir gereklilik haline getirmiştir. Bu bağlamda yürütülen çalışmalarda, deprem risk haritalarının oluşturulması, kentin kırılgan bölgelerini ortaya koymakta; özellikle sahil bandı ve merkez yerleşimlerde riskin yüksek olduğunu göstermektedir.

¹ Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Ulaştırma Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-6383-1376

Yalova iline yönelik gerçekleştirilen çoklu-tehlike analizinde, deprem ve jeohazard (heyelan) riskleri birlikte değerlendirilmiştir. Şekil 1a–d’de sunulan görsel temsiller; Yalova deprem tehlike haritası (a), heyelan duyarlılık haritası (b), heyelan riski altındaki bölgeler (c) ve Çınarcık–Harmanlar heyelanının tarihsel evrimini (d) bir araya getirerek bütünlüklü bir çoklu-tehlike çerçevesi ortaya koymaktadır (Yalova AFAD, 2022). Senaryo temelli afet analizleri, Yalova’nın ulaşım sisteminin sismik ve jeolojik tehlikelere karşı yüksek derecede hassasiyet gösterdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle alüvyon zeminler üzerinde yer alan sahil şeridi karayolları ve viyadükler, deprem kaynaklı yer hareketi büyütmeleri nedeniyle geçici ağ izolasyonuna yol açabilecek ölçüde kırılabilir bir yapı sergilemektedir. Çınarcık ve Harmanlar ilçelerinde ise tarihsel yamaç kaymalarının yerel ulaşım koridorlarını kesintiye uğrattığı ve heyelan duyarlılığının yüksek olduğu tespit edilmiştir (Şekil 2).

Fonksiyonel dirençlilik değerlendirmeleri, doğu–batı yönlü ulaşım koridorlarında düşük yedeklilik bulunduğunu göstermektedir. Bu durum, kısa süreli kesintilerin dahi acil müdahale süreçlerini ve ekonomik sürekliliği ciddi şekilde aksatabileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 1. Yalova İli için Çoklu-Tehlike Değerlendirmesi (Yalova AFAD, 2022): (a) Deprem tehlike haritası, (b) Heyelan duyarlılık haritası, (c) Heyelan riski altındaki bölgeler ve tarihsel afet konumları, (d) Yalova–Çınarcık–Harmanlar heyelanının olay öncesi ve sonrası uydu görüntüleri ile evrimi.



Şekil 2. Yalova, Çınarcık, Harmanlar Mahallesi'nin 2019 yılına ait görüntüsü (Yalova AFAD, 2022).

TÜİK (2019–2023) verileri, motorlu araç sayısında –özellikle binek otomobillerde– keskin bir artış yaşandığını, buna bağlı olarak trafik kazalarının yükseldiğini, sosyal ve ekonomik maliyetlerin arttığını ve özel araç kullanımına olan bağımlılığın giderek büyüdüğünü göstermektedir. Bu gelişmeler, karbon emisyonları ve yakıt tüketimini artırarak afet senaryolarında kırılganlığı daha da yükseltmektedir. Bu risklerin azaltılması için geliştirilecek stratejiler şunlara odaklanmalıdır:

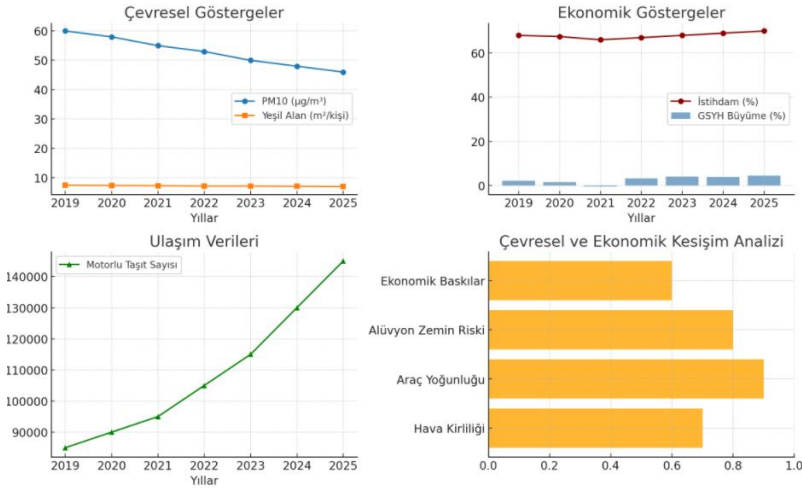
- Çok modlu ulaşımın güçlendirilmesi: Toplu taşımanın deniz yolu (feribot) ve şehirlerarası otobüs ağlarıyla entegre edilmesi, bisiklet ve yaya altyapısının geliştirilmesi.
- Afet dirençliliğinin artırılması: Alüvyon zeminler üzerinde yer alan köprü ve viyadüklerin sismik güçlendirmelerle iyileştirilmesi, afet sonrası ulaşım sürekliliği açısından kritik önem taşımaktadır. Heyelan riski bulunan bölgelerde ise yalnızca yamaç izleme çalışmaları değil, aynı zamanda mühendislik temelli stabilizasyon önlemlerinin uygulanması gereklidir. Bu kapsamda, yüzey ve derin drenaj sistemlerinin kurulması, ankrajlı istinat yapılarının projelendirilmesi, şev stabilitesi analizleriyle güvenlik katsayılarının belirlenmesi ve uygun zemin iyileştirme tekniklerinin (örneğin enjeksiyon, geotekstil donatı uygulamaları) devreye alınması önerilmektedir.
- Akıllı ve düşük karbonlu hareketlilik: Trafik izleme, erken uyarı sistemleri, elektrikli veya paylaşımlı ulaşım türlerini teşvik edici politikaların hayata geçirilmesi.
- Acil durum müdahale kapasitesinin geliştirilmesi: Yedek tahliye güzergâhlarının tanımlanması, alternatif erişim koridorlarının oluşturulması ve ulaşım planlamasının İRAP tabanlı afet yönetim politikalarıyla uyumlu hale getirilmesi.

Birleşmiş Milletler tarafından 2015'te ilan edilen Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA), küresel ölçekte kentsel dönüşüm politikalarına yön veren en kapsamlı çerçevedir. Bu çalışmanın odak noktası olan SKA-11: Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar, kentlerin kapsayıcı, güvenli, dayanıklı ve sürdürülebilir hale getirilmesini amaçlamaktadır (UNDP, 2015; UNDP, 2024). SKA-11'in alt hedefleri Yalova özelinde somut karşılıklar bulmaktadır:

- 11.1 – Güvenli ve uygun fiyatlı konut: 1999 öncesi yapı stokunun kentsel dönüşüm kapsamında yenilenmesi, düşük gelir gruplarının güvenli konutlara erişimi açısından kritik önem taşımaktadır.
- 11.2 – Sürdürülebilir ulaşım sistemleri: Yalova'nın deniz yolu–karayolu entegrasyonunun güçlendirilmesi ve bisiklet yollarının artırılması, hem karbon emisyonlarını azaltacak hem de afet senaryolarında ulaşımın sürekliliğini sağlayacaktır.
- 11.3 – Kapsayıcı ve sürdürülebilir kentsel planlama: Yalova Belediyesi'nin kentsel dönüşüm projelerinde afet risk haritalarını ve ekolojik verileri dikkate alması, katılımcı planlama süreçleriyle desteklenmelidir.
- 11.5 – Afet risklerinin azaltılması: Kuzey Anadolu Fay Hattı üzerindeki kırılğan yerleşimlerde afet yönetimi kapasitesinin güçlendirilmesi ve dirençli altyapı yatırımları öncelikli olmalıdır.
- 11.6 – Çevresel etkilerin azaltılması: Hava kalitesi yönetimi, atık geri dönüşüm programları ve kıyı ekosistemlerinin korunmasıyla çevresel baskılar hafifletilebilir.
- 11.7 – Yeşil alanların erişilebilirliği: Şehir merkezinde kişi başına düşen yeşil alan miktarının artırılması, toplumsal refah ve afet sonrası iyileşme süreçleri için önemli bir stratejidir.

Yalova ili için yapılan çevresel ve ekonomik veri analizi, çok boyutlu kırılğanlıkları ortaya koymaktadır. Şekil 3'de dört ayrı bileşen yer almaktadır: Sol baştan; (A) çevresel göstergeler, (B) ekonomik göstergeler, (C) ulaşım verileri ve (D) çevresel–ekonomik kesişim analizi. 2019–2025 döneminde hava kalitesi (PM10) değerlerinde azalma gözlenirken, kişi başına düşen yeşil alan miktarı gerilemiş; bu durum artan yapılaşmanın çevresel baskı yarattığını göstermektedir. Ekonomik açıdan GSYH büyümesi dalgalı seyir izlerken, istihdam oranı %70 düzeyine çıkmıştır. Ulaşım verileri, motorlu taşıt sayısının 2019'da 85.000'den 2025'te 145.000'e yükseldiğini, bu artışın trafik yoğunluğu ve karbon emisyonlarını artırarak afet senaryolarında kırılğanlığı büyüttüğünü ortaya koymaktadır. Çevresel–ekonomik kesişim analizi ise hava kirliliği, araç yoğunluğu, alüvyon zemin riski ve ekonomik baskıların birlikte

değerlendirildiğinde Yalova’da sürdürülebilir ulaşım politikaları ve kentsel dirençlilik önlemlerinin aciliyet kazandığını ortaya koymaktadır. Bu verilerin kapsadığı çalışma, Yalova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenen 2023/AP/0014 numaralı proje kapsamında yürütülmektedir (BAP, 2024; TÜİK, 2019–2023; Yalova Belediyesi, 2024; Yalova Çevre Durum Raporu, 2023). Bu çerçevede, çalışmada yürütülen çevresel ve ekonomik veri analizleri (Şekil 3), Yalova’nın sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmasında kritik göstergeler sunmaktadır.



Şekil 3. Yalova için çevresel ve ekonomik veri analizi (BAP, 2024: Yalova Üniversitesi BAP Projesi No: 2023/AP/0014, devam ediyor).

Yalova’da yürütülen bu çalışma, yalnızca kente özgü değil, aynı zamanda Türkiye genelinde kentsel dönüşüm politikaları için model geliştirme potansiyeline sahiptir. Kentin deprem riski, hızlı nüfus artışı ve sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle ilişkili sorunları, benzer nitelikler taşıyan diğer Anadolu kentleri için de kıymetli bir referans sunmaktadır. Bu bağlamda Yalova özelinde geliştirilecek stratejiler:

- Deprem riskini azaltacak,
- Çevresel sürdürülebilirliği güçlendirecek,
- Kent ekonomisini çeşitlendirecek,
- Sosyal kapsayıcılığı artıracaktır.

Sonuç olarak, Yalova örneği, kentsel dönüşümün yalnızca afet riskine indirgenemeyeceğini; bunun yanında sürdürülebilir kalkınma, ekonomik büyüme ve toplumsal refah ile doğrudan bağlantılı olduğunu göstermektedir.

2. KURAMSAL ÇERÇEVE

Sürdürülebilir kalkınma kavramı, literatürde ilk kez 1987 tarihli Brundtland Raporu (“Our Common Future”) ile kurumsallaştırılmıştır. Bu raporda sürdürülebilir kalkınma, “gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneğini tehlikeye atmadan, bugünkü nesillerin ihtiyaçlarının karşılanması” olarak tanımlanmıştır (WCED, 1987). Bu yaklaşım, yalnızca ekonomik büyümeyi değil; aynı zamanda toplumsal refah ve çevresel korumayı içeren çok boyutlu bir çerçeve sunmaktadır. Sürdürülebilirlik düşüncesi, Brundtland öncesinde de önemli dönüm noktalarıyla şekillenmiştir. 1972 tarihli BM Stockholm Konferansı çevre sorunlarının küresel ölçekte ele alınmasını sağlamış, 1982 tarihli Dünya Doğa Şartı (World Charter for Nature) ise çevresel sürdürülebilirliği uluslararası politika gündemine taşımıştır (UNEP, 1972; UN, 1982). Bunu takiben 1992 Rio Zirvesi’nde açıklanan Gündem 21 raporu ve 2000 yılında ilan edilen Binyıl Kalkınma Hedefleri (MDGs), sürdürülebilirliğin kurumsallaşmasında kritik adımlar olmuştur (Sachs, 2012; Hak et al., 2016). Bu süreç 2015 yılında Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (Sustainable Development Goals – SDGs) ile küresel bir yol haritasına dönüşmüştür. Toplam 17 hedef altında şekillenen bu küresel çerçeve, yoksulluğun azaltılmasından eşitsizliklerin giderilmesine, iklim değişikliğiyle mücadeleden kapsayıcı ekonomik büyümeye kadar geniş bir alanı kapsamaktadır (UNDP, 2015). Bu çalışmanın odak noktası olan SKA-11: Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar, kentleri ve insan yerleşimlerini kapsayıcı, güvenli, dayanıklı ve sürdürülebilir kılmayı amaçlamaktadır. Bu hedef, özellikle deprem riski yüksek bölgeler için kritik öneme sahiptir. Çünkü güvenli konut, sürdürülebilir ulaşım, katılımcı planlama, afet risklerinin azaltılması ve çevresel kalitenin yükseltilmesi gibi alt hedefler hem Türkiye’nin kentsel dönüşüm politikalarıyla hem de Yalova özelindeki ihtiyaçlarla doğrudan örtüşmektedir (Şekil 4) (UNDP, 2024; BAP, 2024).

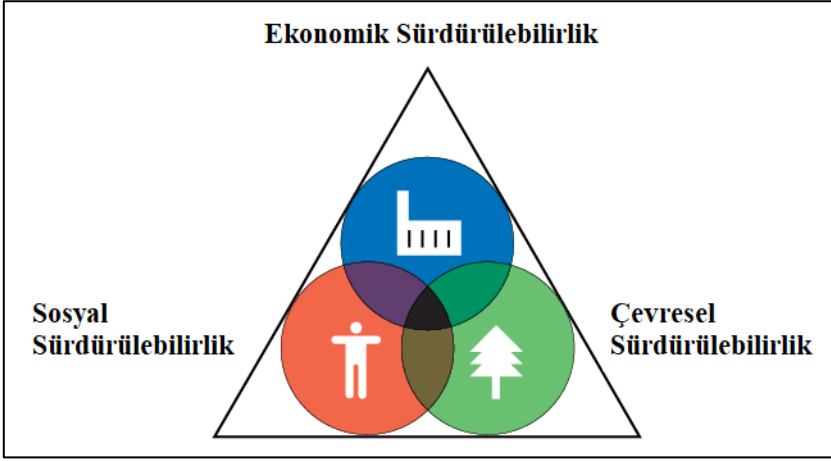


Şekil 4. Sürdürülebilir kalkınma için küresel amaçlar (UNDP, 2024).

Sürdürülebilirliğin teorik temeli ise sıklıkla “üç sacayağı” yaklaşımı ile açıklanmaktadır. Bu yaklaşım, sürdürülebilirliğin yalnızca çevresel değil; aynı zamanda ekonomik ve sosyal boyutlarla bütünleşik olarak ele alınmasını öngörmektedir.

- Ekonomik sürdürülebilirlik: Refah, üretkenlik ve istihdamın devamlılığını, ekonomik çeşitliliği ve rekabetçiliği içerir.
- Sosyal sürdürülebilirlik: Eşitlik, katılım, toplumsal kapsayıcılık ve yaşam kalitesine odaklanır.
- Çevresel sürdürülebilirlik: Doğal kaynakların korunması, ekosistem hizmetlerinin devamlılığı ve iklim değişikliği ile mücadeleyi içerir (Soubotina, 2004).

Bu üçlü boyut, Şekil 5’te gösterilen “sürdürülebilirliğin üç sacayağı” yaklaşımı ile literatürde kavramsallaştırılmaktadır (Soubotina, 2004).



Şekil 5. Sürdürülebilir kalkınmanın boyutları (ekonomik, sosyal, çevresel) (Soubbotina, 2004).

SKA-11, kentsel bağlamda kritik öneme sahip alt hedefler içermektedir. Yalova özelinde bu hedefler doğrudan uygulanabilir politika çerçeveleri sunmaktadır. Kentin deprem riski, hızlı nüfus artışı ve ekolojik hassasiyetleri göz önüne alındığında, güvenli yapı stoğu, sürdürülebilir ulaşım çözümleri ve çevresel kalite yönetimi gibi başlıklar, SKA-11 ile birebir örtüşmektedir

3. SÜRDÜRÜLEBİLİR ŞEHİRLER, DİRENÇLİ KENTLER VE KENTSEL DÖNÜŞÜM

Sürdürülebilir şehirler, ekonomik büyüme, çevresel yönetim ve sosyal kapsayıcılığı dengeli biçimde bütünleştiren; kaynakları etkin kullanan ve çevresel yükü azaltan yerleşimlerdir (UN-Habitat, 2016). Küresel projeksiyonlara göre 2050 yılında dünya nüfusunun %70'inin kentlerde yaşayacağı öngörülmekte ve bu durum, kentlerin sürdürülebilirliğinin gezegen ölçeğinde bir öncelik haline geldiğini göstermektedir (United Nations, 2018). Dirençli kent, afetler ve krizlere karşı uyum sağlama, hasarı en aza indirme ve hızlı toparlanma kapasitesi ile tanımlanır. Bu kavram yalnızca fiziksel altyapının dayanıklılığına değil; aynı zamanda toplumsal farkındalık, yönetim kapasitesi ve planlama süreçlerinin esnekliğine dayanmaktadır (Meerow et al., 2016; IPCC, 2022). Özellikle Yalova gibi deprem riski yüksek şehirlerde, dirençlilik kavramı sürdürülebilirliğin ayrılmaz bir parçası haline gelmektedir. 1999 Marmara Depremi deneyimi, Yalova'da altyapı yetersizlikleri, plansız yapılaşma ve kırılgan toplumsal grupların depremden orantısız biçimde etkilendiğini ortaya koymuştur (Erdik, 2000). Bu bağlamda kentsel dirençlilik, hem fiziksel dayanıklılık (güçlü yapı

stoğu, altyapı güvenliği) hem de sosyal dayanıklılık (katılımcı planlama, afet bilinci, topluluk dayanışması) ile sağlanabilir. Dirençli şehirlerin dört temel boyutu—fiziksel, sosyal, yönetsel ve çevresel—çalışmanın kavramsal temelini oluşturmuştur (Meerow et al., 2016). Bu çerçevede, kentsel dirençliliğin değerlendirilmesinde her bir boyutun sahip olduğu alt unsurlar kritik rol oynamaktadır. Fiziksel boyut altyapı ve ekosistemlerin güvenliğini, sosyal boyut toplumun dayanışma ve kimliğini, yönetsel boyut liderlik ve stratejiyi, çevresel boyut ise doğal kaynakların korunmasını kapsamaktadır. Bu kapsamda, dirençli kentlerin boyutları ve alt unsurları aşağıdaki tabloda özetlenmiştir (Tablo 1). Türkiye’de kentsel dönüşüm politikaları, özellikle 1999 Marmara Depremi sonrası hız kazanmış; afet risklerini azaltma, güvenli yapılaşma ve sürdürülebilir kentleşme politikaları ulusal gündeme girmiştir. 2012 yılında yürürlüğe giren 6306 sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Kanunu, riskli yapıların dönüşümünü yasal zorunluluk haline getirmiştir. Bu kanun, aynı zamanda sosyal, ekonomik ve çevresel hedeflerin bütünleşmesini de amaçlamaktadır (Keleş, 2025; Özdemir, 2010).

Ulusal literatürde kentsel dönüşüm şu yaklaşımlar altında ele alınmıştır:

- Fiziksel yaklaşım: Riskli yapıların yıkımı ve yeniden yapımı (Özdemir, 2010).
- Sosyal yaklaşım: Yerinden edilme sorunları, katılım eksiklikleri, toplumsal bütünleşme (Kurtuluş, 2005; Türkün, 2011).
- Ekonomik yaklaşım: Gayrimenkul değerleri, rant tartışmaları, yerel kalkınmaya etkiler (Balaban, 2012).
- Sürdürülebilirlik yaklaşımı: Enerji verimliliği, yeşil alan kullanımı, çevresel kalite (Karaman & İslam, 2012). Sürdürülebilirlik yaklaşımı, sosyal, çevresel ve ekonomik boyutların yanı sıra yönetsel/kurumsal sürdürülebilirlik boyutunu da içermektedir. Bu çerçevede, kentlerin yalnızca doğal ve ekonomik kaynaklarını değil, aynı zamanda yönetim kapasitelerini ve kurumsal adaptasyon becerilerini güçlendirmeleri gerektiği vurgulanmaktadır (Meerow et al., 2016).

Ulusal ve uluslararası yazında, Yalova’ya özgü kentsel dönüşüm stratejilerinin sınırlı sayıda ele alındığı görülmektedir (BAP, 2024). Çalışmaların büyük bölümü İstanbul, İzmir ve Ankara gibi metropollere odaklanmış; küçük ve orta ölçekli, yüksek riskli kentlerde sürdürülebilir kentsel dönüşüm politikaları yeterince incelenmemiştir.

Tablo 1. Dirençli Kentlerin Boyutları (Meerow et al., 2016’dan uyarlanmıştır).

Boyut	Alt Unsurlar
Sağlık ve Refah	- İnsan kırılganlığının en aza indirilmesi - Çeşitli geçim kaynakları ve istihdam - İnsan yaşamı ve sağlığına yönelik yeterli koruma
Ekonomi ve Toplum	- Kolektif kimlik ve karşılıklı destek - Sosyal istikrar ve güvenlik - Ekonomik güvence
Altyapı ve Ekosistemler	- Fiziksel maruziyet ve kırılganlığın azaltılması - Kritik hizmetlerin sürekliliği - Güvenilir iletişim ve ulaşım
Liderlik ve Strateji	- Etkili liderlik ve yönetim - Güçlendirilmiş paydaşlar - Entegre kalkınma planlaması

Özellikle çevresel ve ekonomik verilerin kentsel dönüşüm stratejilerine entegrasyonu, literatürde eksik bir boyut olarak öne çıkmaktadır. Yalova için geliştirilen bu yaklaşım; deprem risk haritaları, ekonomik göstergeler ve çevresel sürdürülebilirlik verilerini birlikte değerlendirerek hem ulusal hem de uluslararası literatüre katkı yapma potansiyeli taşımaktadır. Uluslararası düzeyde, Sendai Afet Risklerinin Azaltılması Çerçevesi (UNDRR, 2015–2030), Paris İklim Anlaşması (UNFCCC, 2015) ve Yeni Kentsel Gündem (Habitat III, 2016), sürdürülebilir şehirler ve dirençli kentler kavramlarını küresel ölçekte pekiştirmiştir. Uluslararası literatürde Tokyo, Santiago ve Rotterdam gibi kentlerde yürütülen çalışmalar, kentsel dirençlilik politikalarının farklı ölçeklerde ve bağlamlarda nasıl geliştirildiğini göstermektedir. Tokyo örneğinde, deprem sonrası yeniden yapılanmada katılımcı planlama ile birlikte risk bazlı mikro-bölgeleme (microzonation) analizleri ve yapı envanteri taramaları, deprem risklerinin hassas haritalanmasında kritik rol oynamıştır. Santiago’da 2010 depremi sonrasında uygulanan kırılganlık odaklı yeniden yapılandırma politikaları, sosyo-ekonomik eşitsizliklerle birlikte değerlendirilen çok kriterli afet riski analizleri ile desteklenmiştir. Rotterdam’da ise iklim adaptasyonu kapsamında yeşil altyapı çözümleri ile su yönetimi entegrasyonuna dayalı “Room for the River” stratejisi, taşkın riskini azaltırken kentsel yaşam kalitesini artırmayı hedefleyen entegre bir dirençlilik modeli sunmaktadır. Yalova örneği, bu uluslararası deneyimlerle benzer bir yaklaşım sergilemekte; ancak özgün katkısı, yerel ekonomik ve çevresel verilerin deprem risk analiziyle bütünleştirilmesinde ortaya çıkmaktadır.

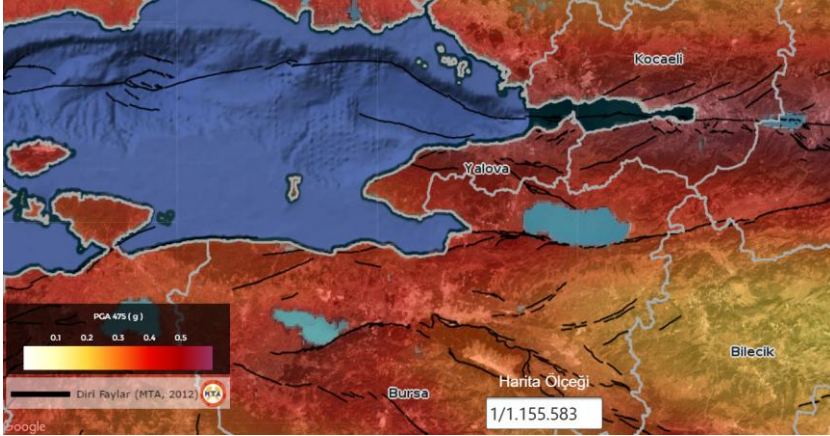
4. YALOVA ÖRNEĞİNDE MEVCUT DURUM ANALİZİ

Yalova, Marmara Bölgesi'nin en küçük illerinden biri olmasına rağmen, sanayi ve tarıma dayalı ekonomik yapısıyla stratejik bir konuma sahiptir. Çevresel açıdan değerlendirildiğinde, Yalova'nın hem Marmara Denizi kıyısında bulunması hem de geniş ormanlık alanlar ve tarım arazilerini bünyesinde barındırması, ekolojik hassasiyetleri ön plana çıkarmaktadır. Ancak hızlı sanayileşme ve nüfus artışı, kıyı ekosistemleri ve içme suyu havzaları üzerinde baskı yaratmakta; hava kalitesi, su kaynaklarının kullanımı ve atık yönetimi gibi çevresel göstergeler ekonomik verilerle birlikte ele alındığında sürdürülebilirlik açısından kritik uyarılar vermektedir. TÜİK (2023) verilerine göre, Yalova'da kişi başına düşen yeşil alan miktarı 2019 yılında yaklaşık 11,8 m² iken 2025 itibarıyla 9,2 m²'ye gerilemiştir. Hava kalitesi göstergesi olan PM10 değerleri ise aynı dönemde yıllık ortalama 46 µg/m³'ten 34 µg/m³'e düşmüş, bu durum hava kirliliğinde kısmi bir iyileşmeye işaret etmiştir. Atık yönetimi açısından bakıldığında, 2019'da kişi başına günlük 1,1 kg olan belediye atığı miktarı 2025'te 1,4 kg'a yükselmiştir.

Sismik açıdan bakıldığında, Yalova Kuzey Anadolu Fay Hattı'nın Marmara segmenti üzerinde yer almakta olup, Türkiye'nin en yüksek deprem tehlikesine sahip bölgelerinden biridir. Nitekim 17 Ağustos 1999 Marmara Depremi'nde en ağır hasarı gören şehirlerden biri Yalova olmuştur. Kentin mevcut yapı stokunun büyük bölümü 1999 öncesinde inşa edilmiş olup, önemli bir kısmı yürürlükteki deprem yönetmeliklerine uygun değildir (Kurt & Haybat, 2014; AFAD, 2018). Bu çalışma, Yalova Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü tarafından 2023/AP/0014 kodlu proje kapsamında yürütülmüş; zemin özellikleri, sismik analizler ve yapı envanteri değerlendirilerek deprem risk haritaları hazırlanmıştır (AFAD, 2018; BAP, 2024) (Şekil 6). Bu haritalar hazırlanırken, AFAD (2018) tarafından yayımlanan Türkiye Deprem Tehlike Haritası'nda belirtilen tasarım ivme değerleri ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018) esas alınmıştır. Mikro-bölgeleme çalışmalarında yerel zemin sınıfları dikkate alınmış, özellikle alüvyon zeminlerde spektral ivme değerlerinin (S_s, S₁) büyütme katsayıları üzerinden analiz yapılmıştır. Ayrıca MTA (2012) tarafından yayımlanan Türkiye Diri Fay Haritası kullanılarak, diri fay hatlarının dağılımı risk analizine entegre edilmiştir. Bu haritalar, yüksek riskli bölgelerin (özellikle sahil bandı ve merkez ilçeler) belirlenmesi ve kentsel dönüşüm politikalarının önceliklendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Şekil 6'da görüldüğü üzere, bölge genelinde 475 yıl dönüş periyoduna göre hesaplanan en yüksek ivme değerleri (PGA) 0.4–0.5 g aralığında olup, bu değerler özellikle kıyı ve merkez yerleşimlerde yoğunlaşmaktadır. Bu durum, kentsel alanların sahil şeridi boyunca yüksek deprem tehlikesine maruz

kaldığını göstermekte; diri fayların dağılımı ise Yalova ve çevresindeki kırılğan yerleşimlerin olası yıkıcı depremler açısından ciddi risk altında olduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen bu değerler, Türkiye Deprem Tehlike Haritası'nda (AFAD, 2018) belirtilen ulusal düzeydeki tasarım ivme değerleri ile karşılaştırıldığında, Yalova'nın ülke genelinde en yüksek risk zonları içerisinde yer aldığı açıkça görülmektedir. Dolayısıyla kentin deprem güvenliği, yalnızca yerel ölçekte değil, ulusal risk profilinde de kritik öncelik arz etmektedir.

Yalova'nın kentsel gelişimi, özellikle hızlı nüfus artışı, göç ve düzensiz yapılaşma ile şekillenmiştir. 1999 sonrası süreçte 6306 sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Kanunu ile riskli yapıların dönüştürülmesi hedeflenmiş olsa da, yerel ölçekli strateji eksiklikleri uygulamada önemli bir sorun olarak öne çıkmaktadır (Özdemir, 2010; Keleş, 2025). Başlıca kentsel sorunlar şunlardır:



Şekil 6. Yalova ili ve çevresinin 475 yıl dönüş periyoduna göre hesaplanmış ivme değerlerini (PGA) gösteren deprem tehlike haritası ve diri fayların dağılımı (MTA, 2012).

- Düzensiz yapılaşma ve gecekondü alanları,
- Altyapı yetersizlikleri (kanalizasyon, yağmur suyu tahliyesi),
- Yeşil alan kaybı ve kıyı ekosistemlerinin bozulması,
- Yerel planlama ve katılımcı yönetim eksiklikleri.

Bu sorunlar, SKA-11'in (Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar) alt hedefleri ile doğrudan ilişkilidir. Özellikle “afet risklerinin azaltılması” (11.5), “katılımcı planlama” (11.3) ve “hava kalitesinin iyileştirilmesi” (11.6) Yalova için öncelikli politika alanlarını tanımlamaktadır (UNDP, 2024). Mevcut durum analizi göstermektedir ki Yalova, ekonomik potansiyeli ile öne çıkan ancak deprem riski ve çevresel hassasiyetleri nedeniyle kırılğan bir kenttir. Çevresel-ekonomik verilerin entegre edilmesi ve deprem risk haritalarının stratejik planlama

süreçlerine dahil edilmesi hem sürdürülebilir kalkınma hedeflerine hem de yerel kentsel dönüşüm politikalarına katkı sağlayacaktır.

5. ÇEVRESEL, EKONOMİK VE DEPREM RİSKİ GÖSTERGELERİ İLE KENTSEL KIRILGANLIK ANALİZİ

Yalova, Marmara Bölgesi'nin en küçük yüzölçümüne sahip illerinden biri olmasına rağmen, stratejik konumu, ekonomik faaliyetleri ve jeolojik yapısı nedeniyle sürdürülebilir kentsel dönüşüm politikaları açısından kritik bir örnek niteliği taşımaktadır. Özellikle 1999 Marmara Depremi sonrasında kentin deprem riski, ekonomik bağımlılık ve çevresel kırılganlık parametreleri birlikte ele alındığında, SKA-11 (Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar) bağlamında çok boyutlu bir stratejik planlamanın gerekliliği ortaya çıkmaktadır. TÜİK verileri ve yerel kurum raporları, Yalova ekonomisinin ağırlıklı olarak sanayi (kimya, otomotiv yan sanayi, liman faaliyetleri) ve tarım (seracılık, süs bitkileri, meyvecilik) sektörlerine dayalı olduğunu göstermektedir. Liman ve sanayi faaliyetleri ilin ekonomik kalkınmasına katkı sağlamakla birlikte, çevresel baskıları da artırmaktadır. Marmara Denizi kıyısında yer alan kent, aynı zamanda ormanlık alanlar ve tarım arazileri açısından zengin bir ekosisteme sahiptir; ancak nüfus artışı, göç ve sanayileşme süreçleri kıyı ekosistemlerini, su kaynaklarını ve tarım alanlarını ciddi şekilde tehdit etmektedir. Yapılan analizlerde hava kalitesi, su kaynaklarının kullanımı ve atık yönetimi öncelikli göstergeler olarak ele alınmış; özellikle su kaynakları üzerinde artan sanayi baskısı ve tarım arazilerinin imara açılmasından kaynaklı kayıplar öne çıkmıştır. Yalova'nın kırılganlığını artıran en temel parametrelerden biri deprem riskidir. Kuzey Anadolu Fay Zonu üzerinde yer alan il, yüksek deprem riski taşımakta olup, 1999 Marmara Depremi bu riskin somut göstergesi olmuştur. Araştırmalarda zemin yapısı, fay hatlarına yakınlık ve mevcut yapı stoku özellikleri temel parametreler olarak dikkate alınmış, mikro-bölgeleme çalışmalarında özellikle kıyı kesimleri ve düşük taşıma gücüne sahip zeminlerde yüksek risk yoğunluğu belirlenmiştir. Kurt ve Haybat'ın (2014) çalışması, Yalova'da jeomorfolojik özelliklerin yerleşim kararlarında yeterince dikkate alınmamasının, deprem, sel ve heyelan gibi afetlerin etkilerini ağırlaştırdığını göstermektedir. Uluslararası örneklerde de benzer kırılganlıklar gözlemlenmiştir: 1995 Kobe Depremi, sanayi ve liman kenti yapısının kentsel yıkımı nasıl artırdığını ortaya koymuş; San Francisco'da 1989 Loma Prieta Depremi, zayıf zemin koşullarına sahip bölgelerde (örneğin Marina District) ağır yıkımlara yol açmıştır. Şili'de 2010 Santiago Depremi ise yapı stokunun kırılganlığının, sosyo-ekonomik eşitsizliklerle birleştiğinde afetin etkilerini katbekat artırdığını göstermiştir (Chang, 1996; Tierney, 2007). Kent dokusu ise hızlı nüfus artışı ve göçün etkisiyle düzensiz yapılaşma, gecekondü bölgelerinin

artışı, altyapı yetersizlikleri ve yeşil alan kayıpları gibi sorunlarla karşı karşıyadır. Bu süreç, özellikle düşük gelir gruplarının yoğun yaşadığı bölgelerde, fiziksel risklerle sosyal eşitsizliklerin birleşmesine yol açmakta ve kentsel kırılganlığı daha da artırmaktadır. Kent dokusu, hızlı nüfus artışı, düzensiz yapılaşma ve altyapı yetersizlikleri nedeniyle afetlere karşı kırılgan bir yapı sergilemektedir. Bu kırılganlığın daha teknik düzeyde analiz edilebilmesi için çok kriterli karar analizi (ÇKKA) yöntemleri, CBS tabanlı senaryo analizleri ve IRAP metodolojisi gibi nicel araçların kullanılması, kentsel risklerin mekânsal dağılımını ve önceliklendirilmesini daha sistematik şekilde ortaya koyacaktır. Kırılganlık yalnızca yapısal dayanıklılık eksikliklerinden değil, aynı zamanda sosyo-ekonomik koşullardan kaynaklanan savunmasızlıklardan da beslenmektedir. Bulgular göstermektedir ki çevresel açıdan hava kalitesinde dönemsel bozulmalar, atık yönetiminde yetersizlikler ve tarım alanlarının kaybı öne çıkarken; ekonomik açıdan sanayiye dayalı yapı çevresel riskleri artırmakta ve sürdürülebilir kalkınma dengesini tehdit etmektedir. Deprem açısından fay hattına yakın bölgeler ve zayıf zemin koşullarına sahip alanlar yüksek risk taşımakta, kentsel kırılganlık açısından ise sosyo-ekonomik eşitsizlikler, altyapı eksiklikleri ve düzensiz yapılaşma afetlere karşı direnç kapasitesini azaltmaktadır. Dolayısıyla Yalova için geliştirilecek kentsel dönüşüm stratejileri, yalnızca deprem riskini azaltmaya değil; aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliği artırmaya, ekonomik çeşitliliği desteklemeye ve toplumsal kapsayıcılığı güçlendirmeye odaklanmalıdır. SKA-11'in "afetlerden kaynaklı can ve mal kayıplarının azaltılması" alt hedefi doğrultusunda önerilen stratejiler, deprem risk haritalarına dayalı önceliklendirilmiş dönüşüm uygulamaları, enerji verimliliği ve yeşil altyapı çözümlerinin yaygınlaştırılması, katılımcı planlama süreçleriyle yerel halkın ve meslek odalarının sürece dahil edilmesi ve dezavantajlı grupların barınma ve erişilebilirlik ihtiyaçlarının gözetilmesi olarak özetlenebilir. Böylece Yalova özelinde geliştirilecek dönüşüm politikaları, yalnızca yerel düzeyde değil, benzer risk profiline sahip tüm kentler için uygulanabilir model önerileri sunmaktadır.

6. SONUÇ VE TARTIŞMA

Yalova ili, stratejik konumu, sanayileşme dinamikleri ve demografik yapısı nedeniyle Türkiye'nin en kırılgan kentlerinden biridir. Özellikle Kuzey Anadolu Fay Hattı üzerindeki konumu, kentsel dönüşüm stratejilerinde deprem riskini birincil öncelik haline getirmektedir. Çalışmada geliştirilen çevresel ve ekonomik göstergelerle deprem risk verilerinin entegrasyonu, kentin mevcut kırılganlığını çok boyutlu olarak ortaya koymuştur. Bulgular, plansız gelişim, yüksek yapı yoğunluğu ve yetersiz altyapının Yalova'yı afetlere karşı savunmasız hale

getirdiğini göstermektedir. Bununla birlikte, ekonomik analizler kentsel dönüşümün yalnızca risk azaltıcı bir araç değil, aynı zamanda istihdam, gayrimenkul değerleri ve yerel ekonomik çeşitlilik açısından bir kalkınma dinamiği olarak da değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu kapsamda, Yalova özelinde geliştirilen metodolojik yaklaşımın Türkiye’de deprem riski yüksek diğer kentlere uyarlanabilir nitelikte olduğu görülmektedir. Uyarlanabilirlik kriterleri, özellikle nüfus büyüklüğü (100.000–500.000 arası), yüksek deprem tehlikesine sahip fay zonları üzerinde yer alma ve sanayi yoğunluğunun kentsel çevreye baskı oluşturması şeklinde tanımlanabilir. Bu kriterler çerçevesinde, Marmara Bölgesi başta olmak üzere benzer dinamiklere sahip orta ölçekli kentlerde uygulanabilir bir model ortaya konmaktadır. AFAD, TÜİK ve belediye verilerinin birlikte değerlendirilmesiyle elde edilen model, ulusal düzeyde politika tasarımlarına rehberlik edebilecek esnek ve ölçeklenebilir bir çerçeve sunmaktadır. 6306 sayılı Kanun’un sağladığı yasal altyapı, bu modelin kurumsal düzeyde uygulanabilirliğini güçlendirmektedir. Ancak uygulamanın salt yapı yenileme eksenli değil, SKA-11’in alt hedefleri doğrultusunda kapsayıcı planlama, sürdürülebilir ulaşım ve afet risk azaltımı ile entegre edilmesi gereklidir. Uluslararası literatürle karşılaştırıldığında, Yalova örneğinin özgün katkısı açıkça ortaya çıkmaktadır. Tokyo’nun deprem sonrası yeniden yapılanma politikaları, mühendislik odaklı dayanıklılığı ön plana çıkarırken; Şili’nin Santiago kentinde uygulanan risk odaklı kentsel planlama, katılımcı süreçleri ve sosyal kapsayıcılığı güçlendirmiştir. Yalova’da geliştirilen model ise, bu iki yaklaşımı tamamlayıcı biçimde, ekonomik verilerin deprem riski analizine entegre edilmesiyle farklılaşmaktadır. Bu yönüyle çalışma, UN-Habitat (2016) ve IPCC (2022) raporlarında vurgulanan sürdürülebilir ve dirençli kent paradigmasına doğrudan katkı sunmaktadır. Ayrıca, yerel ekonomik kalkınma ile afet risk yönetiminin eş zamanlı değerlendirilmesi, uluslararası yazında görece sınırlı ele alınan bir perspektif olup, Türkiye literatürünün küresel bilimsel tartışmalara özgün bir katkı sağlaması açısından önem taşımaktadır. Politika önceliklendirmesi açısından, kısa vadede (0–5 yıl) sismik güçlendirmeler, heyelan bölgelerinde drenaj ve izleme sistemlerinin kurulması, afet erken uyarı mekanizmalarının devreye alınması ve mikro-bölgeleme çalışmalarının tamamlanması kritik adımlar olarak öne çıkmaktadır. Orta–uzun vadede (5–15 yıl) ise deniz–kara ulaşım entegrasyonu, sürdürülebilir toplu taşıma ve bisiklet-yaya altyapısının geliştirilmesi, elektrikli ve paylaşımlı araç kullanımını teşvik edecek mekanizmaların oluşturulması ve SKA-11 hedefleri doğrultusunda kapsayıcı kentsel dönüşüm projelerinin hayata geçirilmesi gerekmektedir. Sonuç olarak, Yalova’da geliştirilen bütüncül yaklaşım, deprem riskine duyarlı kentsel dönüşümün yalnızca fiziksel güvenliği değil, aynı

zamanda çevresel sürdürülebilirlik, ekonomik canlılık ve sosyal kapsayıcılığı hedefleyen stratejik bir politika alanı olarak tasarlanması gerektiğini göstermektedir. Bu model, uyulanabilirlik kriterleriyle tanımlanmış çerçevesi ve kısa–uzun vadeli politika önceliklendirmesi sayesinde Marmara Bölgesi başta olmak üzere benzer risk profiline sahip kentlerde uygulanabilir niteliktedir ve uluslararası ölçekte de karşılaştırmalı kentsel dirençlilik literatürüne katkı sağlamaktadır.

TEŞEKKÜR VE ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Bu çalışmanın hazırlanmasında (Proje No: 2023_AP_0014) numaralı BAP (2024) projesinden sağlanan akademik ve bilimsel katkılardan yararlanılmıştır. Yazar, proje desteği için Yalova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür eder. Yazar, çalışma sürecinde herhangi bir çıkar çatışması bulunmadığını beyan eder. Çalışma, tamamen bağımsız bir şekilde, bilimsel etik ilkeler ve akademik standartlar çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Bu kitap bölümü tek yazarlı olarak hazırlanmıştır ve yazar tüm sorumluluğu üstlenmektedir.

KAYNAKLAR

1. AFAD – T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2018). Türkiye Deprem Tehlike Haritası ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Ankara: AFAD.
2. Balaban, O. (2012). The negative effects of construction boom on urban planning and environment in Turkey: Unravelling the role of the public sector. *Habitat International*, 36(1), 26–35. doi:10.1016/j.habitatint.2011.05.003.
3. Chang, S. E. (2010). Urban disaster recovery: A measurement framework and its application to the 1995 Kobe earthquake. *Disasters*, 34(2), 303–327. doi:10.1111/j.1467-7717.2009.01130.x.
4. Erdik, M. (2000). The 1999 Kocaeli (Izmit)–Düzce (Turkey) earthquakes. *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering* (Paper No. 1793). Auckland.
5. Hak, T., Janoušková, S., & Moldan, B. (2016). Sustainable Development Goals: A need for relevant indicators. *Ecological Indicators*, 60, 565–573. doi:10.1016/j.ecolind.2015.08.003.
6. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
7. Karaman, O., & Islam, T. (2012). On the dual nature of intra-urban borders: The case of a Romani neighborhood in Istanbul. *Cities*, 29(4), 234–243. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2011.12.008>.
8. Keleş, R. (2025). *Kentleşme politikası* (21. baskı). Ankara: İmge Kitabevi. ISBN: 9789755330532.
9. Kurt, Ş., & Haybat, H. (2014). Evaluation of location selection in Yalova in terms of geomorphologic features and natural risks. In R. Efe, T. Onay, I. Sharuho, & E. Atasoy (Eds.), *Urban and urbanization* (pp. 673–689). Sofia: St. Kliment Ohridski University Press.
10. Kurtuluş, H. (Ed.). (2005). *İstanbul’da kentsel ayrışma: Mekânsal dönüşümde farklı boyutlar*. İstanbul: Bağlam Yayınları.
11. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA). (2012). *Türkiye diri fay haritası* (1:250.000 ölçekli). Ankara: MTA Genel Müdürlüğü, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı.

12. Meerow, S., Newell, J. P., & Stults, M. (2016). Defining urban resilience: A review. *Landscape and Urban Planning*, 147, 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.11.011>.
13. Özdemir, D. (2010). Kentsel dönüşüm olgusunun süreç içinde değişen anlamları. In D. Özdemir (Ed.), *Kentsel dönüşümde politika, mevzuat, uygulama: Avrupa deneyimi, İstanbul uygulamaları* (1. baskı, ss. 1–31). Ankara: Nobel Yayın.
14. Sachs, J. D. (2012). From Millennium Development Goals to Sustainable Development Goals. *The Lancet*, 379(9832), 2206–2211. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(12\)60685-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)60685-0).
15. Soubbotina, T. P. (2004). *Beyond economic growth: An introduction to sustainable development* (2nd ed.). Washington, DC: World Bank. <https://doi.org/10.1596/0-8213-5933-9>.
16. Tierney, K. J. (2007). From the margins to the mainstream? Disaster research at the crossroads. *Annual Review of Sociology*, 33, 503–525. <https://doi.org/10.1146/annurev.soc.33.040406.131743>.
17. T.C. Resmî Gazete. (2012). 6306 sayılı Afet riski altındaki alanların dönüştürülmesi hakkında kanun (31.05.2012, RG No: 28309).
18. TÜİK – Türkiye İstatistik Kurumu. (2023). *İstatistik veri portalı – İl göstergeleri (Yalova)*. Ankara: TÜİK.
19. Türkün, A. (Ed.). (2014). *Mülk, mahal, insan: Türkiye’de kentsel dönüşüm*. İstanbul: İstanbul Bilgi Üniversitesi Yayınları.
20. UNDRR – United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2015). Sendai framework for disaster risk reduction 2015–2030. Geneva: United Nations. <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>.
21. UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change. (2015). Paris Agreement. Bonn: UNFCCC Secretariat. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf.
22. United Nations (UN). (1982). *World charter for nature*. New York: United Nations General Assembly, Resolution A/RES/37/7.
23. United Nations. (2016). *New urban agenda* (adopted at Habitat III, Quito). New York: United Nations.
24. United Nations Development Programme (UNDP). (2015). *Human development report 2015: Work for human development*. New York: UNDP.
25. United Nations Development Programme (UNDP). (2024). *Sustainable development goals report 2024*. New York: UNDP.

26. United Nations Environment Programme (UNEP). (1972). *Declaration of the United Nations Conference on the Human Environment (Stockholm Declaration)*. Stockholm: United Nations.
27. United Nations, DESA/Population Division. (2018). *World urbanization prospects: The 2018 revision*. New York: United Nations.
28. UN-Habitat. (2016). *World cities report 2016: Urbanization and development – Emerging futures*. Nairobi: UN-Habitat.
29. WCED – World Commission on Environment and Development. (1987). *Our common future*. Oxford: Oxford University Press.
30. Yalova AFAD. (2022). *Yalova ili afet ve acil durum raporu*. Yalova: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD).
31. Yalova Belediyesi. (2024). *Yalova Ulaşım Müdürlüğü faaliyet raporu*. Yalova: Yalova Belediyesi.
32. Yalova Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü. (2023). *Yalova çevre durum raporu 2023*. Yalova: T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı.
33. Yalova Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü. (2024). *2023/AP/0014, 1. Ara rapor (9 Temmuz 2024)*. Yalova: YÜ-BAP.



BÖLÜM 8

Tekstilde Kullanılan Hammaddelerin Yıllara Göre Değişimi

Emine BAKAN¹

1. GİRİŞ

Tekstil sektörü, insanlık tarihinin en eski ve en köklü üretim alanlarından biridir. Giyim ve barınma gibi temel ihtiyaçları karşılamakla başlayan tekstil üretimi, zaman içinde estetik, statü ve kimlik göstergesi işlevleri üstlenmiş; kültürel ve teknolojik değişimlerle birlikte sürekli evrilmiştir (Costa vd., 2020). Tekstil mühendisliği açısından bakıldığında ise bu evrimin en kritik unsuru, kullanılan hammaddelerin türü, temin yöntemleri ve işlenme teknikleridir. Lif kaynaklarının çeşitlenmesi, yalnızca teknik üretim kapasitesini değil, aynı zamanda üretim maliyetlerini, ürün performansını, küresel ticaret akışlarını ve çevresel etki düzeylerini de belirleyen temel faktördür.

Tarihsel süreçte ilk tekstil hammaddeleri, tamamen doğadan elde edilen liflerden oluşmaktaydı. Pamuk, yün, keten ve ipek gibi lifler, binlerce yıl boyunca farklı coğrafyalarda iklim, kültür ve ekonomik koşullara göre şekillenen tekstil kültürlerinin temelini oluşturdu (Kadolph, 2014). Örneğin Mısır’da keten, sıcak iklim koşulları ve Nil Nehri çevresindeki tarımsal verimlilik nedeniyle tercih edilirken; Orta Asya ve Anadolu’da yün, soğuk iklimlerde sağladığı ısı yalıtımı sayesinde yaygın bir hammadde olmuştur. Çin’de ise ipek üretimi, MÖ 3000’lere kadar uzanan köklü bir gelenek olarak başlamış ve İpek Yolu aracılığıyla küresel ölçekte ticari ve kültürel etkileşim yaratmıştır (Good, 2017).

18. yüzyılda Sanayi Devrimi ile birlikte tekstil üretiminde köklü bir dönüşüm yaşanmıştır. Mekanik eğirme ve dokuma makinelerinin geliştirilmesi, üretim hızını artırırken, 20. yüzyılın ortalarında kimya endüstrisindeki gelişmeler sayesinde naylon, polyester ve akrilik gibi sentetik lifler ortaya çıkmıştır. 1960’lardan itibaren sentetik lif üretimi hızla artmış; 2000’li yılların başında dünya lif üretiminin %50’sinden fazlasını oluşturur hâle gelmiştir (Textile Exchange, 2024). 2023 verilerine göre küresel lif üretimi 124 milyon tona ulaşmış olup, bunun yaklaşık %70’i sentetik liflerden, %25’i pamuktan, geri kalanı ise yün, keten ve diğer doğal liflerden oluşmaktadır (UNCTAD, 2023).

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Uşak Üniversitesi Ulubey Meslek Yüksekokulu
ORCID: 0000-0002-3463-4314

Sentetik liflerin yükselişi, üretim maliyetlerinin düşmesi, ürün dayanıklılığının artması ve modanın hızlı döngülerine uyum sağlanabilmesi açısından avantajlar sağlamıştır. Ancak bu durum, çevresel etkiler açısından yeni sorun alanları yaratmıştır. Polyester gibi petrol türevli lifler biyolojik olarak parçalanmaz ve kullanım ömürleri sona erdiğinde mikro plastik kirliliğine yol açar (Henry vd., 2019). Öte yandan, doğal liflerin de çevresel yükü küçümsenemez; özellikle pamuk üretimi, yüksek su ve pestisit kullanımı nedeniyle ekosistemler üzerinde ciddi baskılar yaratmaktadır. Bir kilogram pamuk üretimi, yetiştirme yöntemine ve coğrafi koşullara bağlı olarak ortalama 8.920–10.000 litre su gerektirmektedir (ICAC, 2023).

21. yüzyılda tekstil sektöründeki hammadde kullanım trendleri, hızlı moda anlayışıyla birlikte daha da dinamik hâle gelmiştir. Moda endüstrisinin yılda onlarca koleksiyon sunması, ürün yaşam döngüsünü kısaltmış, tüketimi hızlandırmış ve dolayısıyla hammadde talebini artırmıştır. Bu durum, kaynak tüketimi, enerji kullanımı, kimyasal kirlilik ve atık yönetimi açısından sürdürülemez bir tabloyu beraberinde getirmiştir (Niinimäki vd., 2020).

Son yıllarda artan çevresel farkındalık, politika yapıcılarının, araştırmacıların ve üreticilerin “sürdürülebilir hammadde” arayışlarını hızlandırmıştır. Geri dönüştürülmüş polyester (rPET), organik pamuk, kenevir ve bambu gibi alternatifler, karbon ve su ayak izini azaltma potansiyeli nedeniyle önem kazanmaktadır. Bununla birlikte, biyoteknolojik yöntemlerle üretilen selüloz bazlı lifler ve biyopolimerler de geleceğin tekstil hammaddeleri arasında gösterilmektedir (RameshKumar vd., 2020).

Bu çalışmada, tekstil hammaddelerinin tarihsel değişimi mühendislik perspektifinden ele alınacak; moda endüstrisi, tüketim alışkanlıkları, kaynak kullanımı ve çevresel etkiler arasındaki ilişkileri veri temelli bir yaklaşımla incelenecektir. Ayrıca, sürdürülebilir hammadde çözümlerinin ve gelecek perspektiflerinin bilimsel ve endüstriyel açıdan tartışılması amaçlanmaktadır.

2. TARİHSEL PERSPEKTİFTE TEKSTİL HAMMADDELERİ

Tekstil hammaddelerinin tarihsel gelişimi, insanlık tarihinin ekonomik, kültürel ve teknolojik dönüşümleriyle doğrudan ilişkilidir. İlk dönemlerden itibaren hammadde seçimi, coğrafi koşullar, yerel kaynak erişimi ve toplumsal ihtiyaçlar tarafından belirlenmiştir. Tablo 1’de tarihte kullanılan ilk tekstil lifleri verilmiştir. Zamanla bu seçimler, teknolojik yenilikler ve küresel ticaret ağlarının etkisiyle çeşitlenmiş ve dönüşmüştür. Bu bölümde, antik dönemlerden günümüze uzanan süreçte tekstil hammaddelerinin evrimi dört ana dönemde incelenmektedir: (i) Antik ve Orta Çağ Dönemleri, (ii) Erken Sanayi Devrimi,

(iii) Sentetik Liflerin Yükselişi, (iv) Modern Dönemde Çeşitlenme ve Küreselleşme.

Tablo 1. Tarihte kullanılan ilk tekstil lifleri

Dönem	Başlıca Lifler	Coğrafi Yoğunluk	Teknik Özellikler	Kullanım Alanları
Antik Çağ (MÖ 3000–MS 500)	Pamuk, yün, keten, ipek	Mezopotamya, Mısır, Çin, Anadolu	Tamamen doğal, elle işlenen lifler	Giyim, ev tekstili, törensel eşyalar
Orta Çağ (MS 500–1500)	Yün, keten, ipek, pamuk	Avrupa, Orta Doğu, Asya	El tezgâhları, boyama teknikleri gelişmiş	Giyim, halı-kilim, dokuma kumaşlar
Sanayi Devrimi (1750–1900)	Pamuk (yoğun), yün, keten	İngiltere, ABD, Hindistan	Mekanik dokuma, seri üretim	Giyim, ev tekstili, sanayi ürünleri
Modern Dönem (1900–2023)	Pamuk, yün, ipek, polyester, naylon, akrilik	Küresel	Yüksek üretim hızı, teknik lif çeşitliliği	Moda, teknik tekstiller, endüstri

2.1 Antik ve Orta Çağ Dönemleri: Doğal Liflerin Hakimiyeti

Antik çağlarda tekstil hammaddeleri tamamen doğadan elde edilen liflerden oluşmaktaydı. Pamuk, yün, keten ve ipek, farklı coğrafyalarda iklim, tarım koşulları ve hayvancılık faaliyetlerine göre ön plana çıkmıştır (Barber, 1991; Kadolph, 2014). Örneğin, Mezopotamya’da MÖ 3000’lerde pamuk ve yün, tarımsal ve pastoral faaliyetlerin bir sonucu olarak yaygınlaşmıştır. Mısır’da Nil Deltası’nın iklimi ve toprağı keten üretimi için ideal koşullar sunmuş; keten, hem günlük giyimde hem de mumyalama bezleri gibi törensel kullanımlarda vazgeçilmez olmuştur (Good, 2017).

Doğu Asya’da ipek üretimi, Çin’in en önemli ekonomik faaliyetlerinden biri hâline gelmiştir. Arkeolojik kanıtlar, MÖ 3000’lerde ipekböceği yetiştiriciliğinin başladığını göstermektedir (Zhao, 2012). İpek Yolu üzerinden yapılan ticaret, ipeğin Batı’ya ulaşmasını sağlamış ve bu değerli hammadde, yüzyıllar boyunca bir lüks sembolü olarak kalmıştır. Avrupa’da ise Orta Çağ boyunca yün üretimi, özellikle İngiltere ve İspanya gibi ülkelerde, hem iç tüketim hem de ihracat açısından ekonomik bir omurga görevi görmüştür (Munro, 2003).

2.2 Erken Sanayi Devrimi: Mekanizasyon ve Hammadde Talebinde Patlama

18. yüzyılın sonları ve 19. yüzyılın başlarında Sanayi Devrimi, tekstil hammaddelerinin üretim ve kullanım biçimlerini köklü şekilde değiştirmiştir. Spinning Jenny (1764), Water Frame (1769) ve Power Loom (1785) gibi mekanik

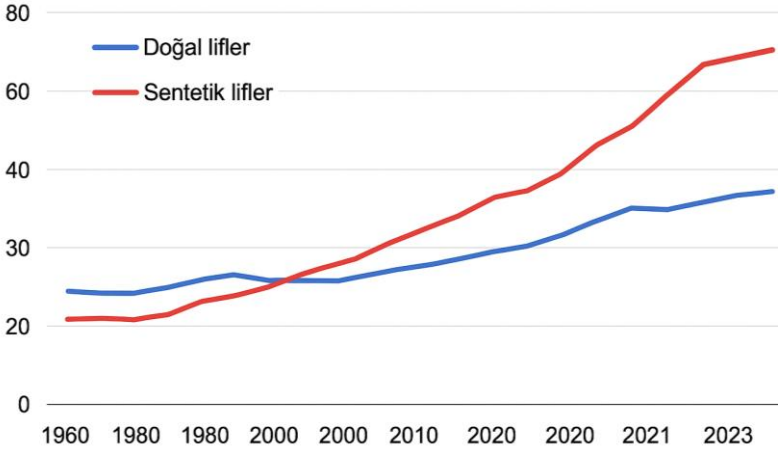
icatlar, üretim hızını ve kapasitesini dramatik şekilde artırmıştır (Chapman, 1972). Bu mekanizasyon, özellikle pamuk talebinde patlamaya yol açmıştır. Amerika Birleşik Devletleri'ndeki pamuk plantasyonları, bu talebi karşılamak için hızla genişlemiş; ancak bu süreç, köle emeğinin yoğun biçimde kullanılmasına da neden olmuştur (Beckert, 2014).

Keten ve yün, geleneksel önemini korumakla birlikte, pamuk hem maliyet hem de işlenebilirlik açısından avantaj sağlamıştır. Bu dönemde pamuk üretiminin küresel ölçekte yayılması, İngiliz tekstil endüstrisinin dünya ekonomisindeki merkezi konumunu pekiştirmiştir. Sanayi Devrimi'nin getirdiği bu üretim kapasitesi artışı, 19. yüzyıl boyunca tekstil hammaddelerinin daha geniş kitlelere ulaşmasına imkân tanımıştır (Riello, 2013).

2.3 Sentetik Liflerin Yükselişi: 20. Yüzyılda Kimya Devrimi

20. yüzyılın başlarında kimya endüstrisindeki gelişmeler, tekstil sektörüne tamamen yeni bir hammadde sınıfı kazandırmıştır: sentetik lifler. 1935'te naylonun DuPont tarafından geliştirilmesi, sentetik liflerin ticari olarak başarıya ulaşmasının ilk adımı olmuştur (Hounshell & Smith, 1988). Bunu, 1940'larda polyester ve akrilik gibi diğer sentetik liflerin geliştirilmesi izlemiştir.

Sentetik lifler, doğal liflere göre daha düşük maliyetli üretim, yüksek dayanıklılık, kırılmazlık ve hızlı kuruma gibi avantajlar sunmuştur (Blackburn, 2009). Özellikle II. Dünya Savaşı sonrasında sentetik lif üretimi büyük bir ivme kazanmış, 1960'lardan itibaren küresel lif pazarında önemli bir paya ulaşmıştır. 1980'lerde spor giyim ve teknik tekstillerde sentetiklerin yoğun kullanımı, bu materyallerin çeşitlenmesini ve teknik özelliklerinin geliştirilmesini sağlamıştır (Horrocks & Anand, 2016). Yıllar içinde sentetik liflerin doğal liflere göre üretimlerinde değişim Şekil 1'de gösterildiği üzere olmuştur.



Şekil 1. Küresel lif üretiminin doğal ve sentetik liflere göre dağılımı (milyon ton; 1960-2023)

2.4 Modern Dönemde Çeşitlenme ve Küreselleşme

21. yüzyılın başından itibaren tekstil hammaddelerinde çeşitlenme eğilimi hız kazanmıştır. Geleneksel doğal ve sentetik liflerin yanı sıra yarı sentetik lifler (ör. viskoz, modal, lyocell) ve biyoteknolojik lifler (ör. polilaktik asit [PLA], bakteriyel selüloz) endüstride kullanılmaya başlanmıştır (RameshKumar vd., 2020). Küreselleşme süreci, hammadde tedarik zincirlerinin dünya çapında yeniden yapılandırılmasına yol açmış; düşük maliyetli üretim Asya ülkelerine kaymıştır (Gereffi ve Frederick, 2010).

Günümüzde, hammadde seçimi sadece teknik performans ve maliyet üzerinden değil; aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik kriterleri üzerinden de değerlendirilmektedir. Tekstil Exchange'in 2024 raporuna göre, 2023 yılında üretilen 124 milyon ton lifin yaklaşık %14'ü geri dönüştürülmüş veya organik sertifikalı hammaddelerden oluşmaktadır (Textile Exchange, 2024). Bu oran hâlâ düşük olmakla birlikte, sektörün uzun vadeli dönüşüm hedefleri açısından önemli bir başlangıç noktasıdır.

3. Moda Endüstrisi ve Hammadde Tercihleri

Moda endüstrisi, yalnızca giyim ürünlerinin tasarımı ve üretiminden ibaret olmayan; kültürel trendler, tüketim davranışları, küresel tedarik zincirleri ve teknolojik yeniliklerle şekillenen çok katmanlı bir sektördür (Breward, 2003). Tekstil hammaddelerinin tercih edilme biçimi de bu ekosistemin merkezinde yer alır. Moda markalarının kullandığı hammadde türleri, ürün fiyatını, kullanım

ömrünü, estetik özelliklerini ve çevresel etkilerini doğrudan belirler (Fletcher ve Tham, 2019).

3.1 Hızlı Moda ve Tüketim Döngülerinin Kısılması

20. yüzyılın son çeyreğinde ortaya çıkan “hızlı moda” (fast fashion) modeli, moda döngülerini yılda iki koleksiyondan neredeyse haftalık ürün yenileme hızına taşımıştır (Joy vd., 2012). Zara, H&M ve Forever 21 gibi markalar, üretim ve dağıtım süreçlerini hızlandırarak düşük maliyetli ürünleri hızlıca piyasaya sürebilir hâle gelmişlerdir. Bu durum, tüketici taleplerini sürekli güncel tutarken, hammadde ihtiyacını da istikrarlı biçimde artırmıştır. Hızlı moda markalarının kullandığı hammaddelerin büyük bölümü, polyester gibi ucuz ve hızlı işlenebilen sentetik liflerden oluşmaktadır. Textile Exchange (2024) verilerine göre, hızlı moda segmentinde sentetik lif oranı %60’ın üzerindedir.

Tablo 2. Moda Segmentlerine Göre Başlıca Hammadde Kullanım Oranları (2023)
(Kaynak: Textile Exchange, 2024; Fashion Revolutions, 2023)

Moda Segmenti	Sentetik Lif Oranı (%)	Doğal Lif Oranı (%)	Diğer-geri dönüştürülmüş, yarı sentetik vb. (%)
Hızlı Moda	60–65	30–35	5–10
Lüks Moda	30–40	50–60	10–15
Spor Giyim	80–85	10–15	5–10

3.2 Tüketici Taleplerinin Üretim Süreçlerine Etkisi

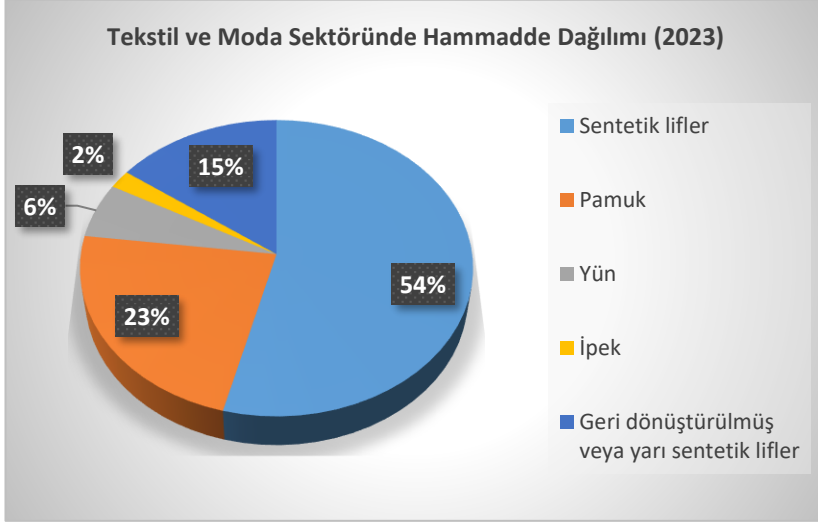
Tüketici beklentileri, özellikle fiyat ve erişilebilirlik açısından üretici kararlarını doğrudan etkiler. Hızlı moda markalarının büyümesinde, düşük maliyetli sentetik liflerin sağladığı fiyat avantajı kritik bir faktördür. Örneğin polyester, pamuktan yaklaşık %30 daha ucuzdur ve üretim süresi kısadır (RameshKumar vd., 2020). Bununla birlikte, doğal liflerin sağladığı konfor ve nefes alabilirlik özellikleri, lüks moda segmentinde hâlen tercih sebebidir.

3.3 Moda Trendleri ve Hammaddelerin Estetik Rolü

Hammadde seçimi yalnızca maliyet ve üretim hızına bağlı değildir; estetik özellikler de belirleyici rol oynar. İpek, parlaklığı ve akışkanlığı nedeniyle hâlâ özel koleksiyonlarda kullanılırken; keten, doğal görünümüyle yaz koleksiyonlarının vazgeçilmezidir. Sentetik lifler ise teknik boyalarla renk dayanıklılığının yüksek olması ve form tutma özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir.

3.4 Küresel Moda Sektöründe Hammadde Dağılımı

2023 verilerine göre küresel moda sektöründe kullanılan hammaddelerin yaklaşık %54'ü sentetik liflerden, %23'ü pamuktan, %6'sı yünden, %2'si ipekten, geri kalanı ise geri dönüştürülmüş veya yarı sentetik liflerden oluşmaktadır (Textile Exchange, 2024). Bu dağılım, sentetik liflerin endüstriyel baskınlığını net şekilde ortaya koymaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. Moda sektöründe hammadde dağılımı

4. Modern Dönemde Kaynak Kullanımı ve Çevresel Etkiler

Günümüzde tekstil endüstrisi, dünyanın en büyük çevresel etki yaratan sektörlerinden biri hâline gelmiştir. Hammadde temininden üretime, dağıtımdan atık yönetimine kadar olan tüm aşamalar ciddi düzeyde doğal kaynak tüketimine neden olmaktadır. Özellikle sentetik liflerin üretimi yüksek miktarda enerji ve petrol türevi gerektirirken, doğal lifler için de yoğun su ve tarım alanı kullanımı söz konusudur. Örneğin, yalnızca bir kilogram pamuk üretimi için ortalama 10.000 litre su harcandığı tahmin edilmektedir; bu da sektörün su kaynakları üzerindeki baskısını açıkça ortaya koymaktadır.

Hızlı modanın teşvik ettiği kısa ömürlü tüketim alışkanlıkları, tekstil atıklarının hızla artmasına yol açmıştır. Kullanıcılar tarafından hızla tüketilip elden çıkarılan giysiler, büyük ölçüde geri dönüştürülemeden çöplüklere gönderilmekte, bu da ciddi çevresel sorunlara neden olmaktadır. Aynı zamanda üretim aşamasında ortaya çıkan atık malzemeler ve kimyasal atıklar, özellikle düşük denetimli üretim merkezlerinde doğrudan çevreye salınmaktadır.

Kaynak israfı yalnızca çevresel değil, aynı zamanda ekonomik ve sosyal boyutlar da içermektedir. İsfraf edilen hammaddeler ve ürünler, ekonomik kaynakların verimsiz kullanımına yol açarken, emeğin değersizleştirilmesine de sebep olmaktadır. Bu nedenle günümüz tekstil endüstrisi, sadece üretim verimliliğini değil, kaynakların etik ve sürdürülebilir kullanımını da sorgulamak zorundadır.

4.1 Su ve Enerji Tüketimi

Su, tekstil üretiminin en yoğun kullanılan kaynaklarından biridir. Özellikle pamuk gibi suya bağımlı bitkilerin yetiştirilmesinde, lifin işlenmesinde ve boyama/terbiye işlemlerinde yüksek miktarda su kullanılır. ICAC (2023) verilerine göre, 1 kg pamuk üretimi için ortalama 8.920–10.000 litre su gerekmektedir. Islak işlem aşamalarında (boyama, yıkama, apreleme vb.) ise 1 kg tekstil ürünü için 50–300 litre su tüketilmektedir (Kant, 2012).

Enerji tüketimi de lif üretim türüne göre değişiklik gösterir. Sentetik lifler, petrokimya temelli üretimleri nedeniyle yüksek enerji gereksinimine sahiptir. Polyester üretimi, pamuk üretimine kıyasla su kullanımında daha düşük olmasına rağmen, enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları açısından daha yüksektir (Shen vd., 2010).

Tablo 3. Seçilmiş Lif Türlerinin Su ve Enerji Tüketimi

Lif Türü	Su Kullanımı (L/kg)	Enerji Kullanımı (MJ/kg)	Kaynak
Pamuk	8 920–10 000	55–65	ICAC, 2023; Kant, 2012
Polyester	17–30	125–150	Shen vd., 2010
Viskoz	400–600	80–90	Shen vd., 2010
Yün	150–200	100–120	FAO, 2022

4.2 Tarım Alanı Kullanımı ve Monokültür Sorunları

Pamuk üretimi, dünya tarım arazilerinin yaklaşık %2,5'ini kaplamaktadır (FAO, 2022). Ancak bu alanlarda yoğun monokültür uygulamaları, toprak verimliliğini düşürmekte ve biyolojik çeşitliliği tehdit etmektedir. Ayrıca, pestisit ve gübre kullanımındaki yoğunluk, su kaynaklarının kirlenmesine yol açmaktadır.

4.3 Tekstil Atıkları ve Geri Dönüşüm Oranları

Her yıl yaklaşık 92 milyon ton tekstil atığı oluşmakta ve bu atıkların büyük kısmı (%87) yakılmakta veya çöplüklere gönderilmektedir (Ellen MacArthur Foundation, 2017). Geri dönüşüm oranı hâlâ düşük olup, kullanılan liflerin yalnızca %12'si yeniden elyaf veya iplik üretiminde kullanılmaktadır (Textile Exchange, 2024).

4.4 Kimyasal Kullanımı ve Çevresel Kirlilik

Tekstil üretiminde kullanılan boyar maddeler, apre kimyasalları ve yardımcı maddeler, özellikle atık su deşarjları yoluyla çevreye yayılmaktadır. Dünya genelinde boyama ve terbiye işlemleri sırasında her yıl yaklaşık 200.000 ton boyar madde su kaynaklarına karışmaktadır (Kant, 2012). Bu maddeler, su ekosistemlerinde toksik birikime ve insan sağlığı üzerinde potansiyel zararlara yol açmaktadır.

5. Sürdürülebilirlik ve Yeni Nesil Hammaddeler

Tekstil sektöründe sürdürülebilirlik kavramı, yalnızca çevresel etkileri azaltmak değil; aynı zamanda sosyal, ekonomik ve teknolojik boyutlarıyla uzun vadeli bir dönüşümü ifade eder. Hammadde seçimi, bu dönüşümün merkezinde yer alır. Geleneksel doğal ve sentetik liflerin çevresel etkileri karşısında, sektör son yıllarda geri dönüştürülmüş, organik, biyobazlı ve laboratuvar ortamında üretilen alternatiflere yönelmektedir.

Tekstil sektöründe çevreye verilen zarar yıllar içinde büyürken, sürdürülebilirlik kavramı giderek daha önemli hâle gelmiştir. Artık birçok marka, yalnızca şık ve ucuz ürünler üretmekle yetinmiyor; aynı zamanda doğaya daha az zarar veren malzemeler kullanmaya çalışıyor. Bu değişimle birlikte, geleneksel pamuk ve polyester gibi hammaddelerin yerini, geri dönüştürülmüş, organik ve bitki bazlı yeni hammaddeler almaya başladı.

Örneğin, geri dönüştürülmüş polyester (rPET), kullanılmış plastik şişelerden elde ediliyor. Böylece hem plastik atıklar yeniden kullanılıyor hem de yeni plastik üretiminin önüne geçiliyor. Organik pamuk, geleneksel pamuğa göre daha az su kullanıyor ve tarım ilaçları kullanılmadan üretildiği için toprağa zarar vermiyor. Bambu, kenevir ve ananas lifleri gibi bitkilerden elde edilen kumaşlar da çevre dostu alternatifler arasında.

Aynı zamanda, sadece hammaddeler değil, üretim ve tüketim şekilleri de değişiyor. Döngüsel ekonomi denilen modelle, artık ürünlerin daha uzun süre kullanılması, onarılması ve geri dönüştürülmesi teşvik ediliyor. Bazı markalar tüm koleksiyonlarını geri dönüştürülmüş malzemelerle üretmeye başlarken, üretim sürecinde daha az su ve enerji kullanmaya da özen gösteriyor.

Bu gelişmeler, tekstil sektörünün daha sorumlu, daha bilinçli ve doğa ile daha uyumlu bir hale gelmeye başladığını göstermektedir.

5.1 Geri Dönüştürülmüş Lifler

En yaygın kullanılan geri dönüştürülmüş hammadde türü rPET (geri dönüştürülmüş polyester) olup, kullanılmış PET şişelerden veya atık polyester kumaşlardan elde edilir. Textile Exchange (2024) verilerine göre, 2023 yılında küresel polyester talebinin %15'i geri dönüştürülmüş kaynaklardan karşılanmıştır. Geri dönüşüm süreci, ham petrol kullanımını ve sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azaltır (Shen vd., 2010).

5.2 Organik Doğal Lifler

Organik pamuk, sentetik pestisit ve gübre kullanılmadan üretilir ve su yönetimi açısından daha verimli yöntemler içerir. Ancak üretim miktarı sınırlıdır; 2023'te toplam pamuk üretiminin yalnızca %1,4'ü organik sertifikalıdır (Textile Exchange, 2023). Benzer şekilde, organik yün üretimi de artmakta, ancak maliyetler yüksek kalmaktadır.

5.3 Biyobazlı ve Biyoteknolojik Lifler

Lyocell, modal ve biyobazlı polyester gibi lifler, selüloz veya biyopolimer tabanlı üretim süreçleri ile öne çıkar. Özellikle lyocell üretiminde kapalı döngü çözücü sistemler sayesinde kimyasal atık %99 oranında geri kazanılabilir (RameshKumar vd., 2020).

Biyoteknolojik yaklaşımlar arasında, mikrobiyal selüloz ve laboratuvarda üretilen ipek proteinleri dikkat çekmektedir. Bu lifler, geleneksel üretime göre daha düşük çevresel ayak izine sahiptir.

Tablo 4. Yeni Nesil Sürdürülebilir Lif Türleri ve Özellikleri

Lif Türü	Kaynak Malzeme	Çevresel Avantajlar	Pazar Payı (2023)
rPET	PET şişe, polyester atık	Ham petrol kullanımını azaltır, düşük CO ₂ emisyonu	%15 (polyester içinde)
Organik Pamuk	Pamuk bitkisi	Pestisit yok, daha düşük su tüketimi	%1,4 (pamuk içinde)
Lyocell	Odun hamuru	Kapalı döngü üretim, düşük kimyasal atık	< %1
Mikrobiyal Selüloz	Bakteriyel üretim	Yenilenebilir, biyobozunabilir	Gelişmekte

Lif Türü	Kaynak Malzeme	Çevresel Avantajlar	Pazar Payı (2023)
Laboratuvar İpeği	Mayalanmış protein	Hayvansal üretim yok, düşük çevresel etki	Gelişmekte

5.4 Pazar Dinamikleri ve Gelecek Potansiyeli

Sürdürülebilir hammaddeler, halen toplam lif pazarında küçük bir paya sahip olsa da, tüketici bilincinin artması, yasal düzenlemeler ve markaların net sıfır hedefleri bu pazarın büyümesini hızlandırmaktadır. Örneğin Avrupa Birliği'nin Sürdürülebilir Tekstil Stratejisi kapsamında 2030 yılına kadar piyasaya sürülecek tüm tekstil ürünlerinin dayanıklı, geri dönüştürülebilir ve çoğunlukla geri dönüştürülmüş liflerden üretilmesi hedeflenmektedir (European Commission, 2022).

6. Tartışma ve Gelecek Perspektifi

Tekstil sektörünün hammaddeler açısından tarihsel gelişimi, insanlık tarihinin teknolojik ilerlemeleri ve sosyoekonomik dönüşümleriyle paralel seyretmiştir. Antik dönemden modern çağa kadar uzanan süreçte doğal lifler (pamuk, yün, ipek, keten vb.) baskın rol oynamış, Sanayi Devrimi'yle birlikte pamuk ön plana çıkmış, 20. yüzyılda ise sentetik lifler küresel pazarın çoğunluğunu oluşturur hale gelmiştir. 21. yüzyılda hammadde kullanımında gözlemlenen çeşitlenme ve sürdürülebilir alternatiflere yönelim, çevresel etkiler ve tüketici bilincindeki artışla doğrudan ilişkilidir (Textile Exchange, 2024; Niinimäki vd., 2020).

Bu kitap bölümünde ortaya konulan veriler, tekstil sektörünün mevcut durumda yüksek hammadde talebi – düşük geri dönüşüm oranı – yüksek çevresel ayak izi üçgeninde sıkıştığını göstermektedir. Örneğin, her yıl yaklaşık 124 milyon ton lif üretilmesine rağmen, kullanılan hammaddelerin yalnızca %14'ü geri dönüştürülmüş veya sürdürülebilir sertifikalıdır (Textile Exchange, 2024). Bu oran, sektörün “döngüsel ekonomi” hedeflerinden ne kadar uzak olduğunu göstermektedir.

6.1 Mevcut Durumun Eleştirisi

Sektörün mevcut hammadde dağılımında sentetik liflerin payı %54 ile baskın durumdadır. Polyester, dayanıklılığı, düşük maliyeti ve üretim hızındaki avantajlarıyla özellikle hızlı moda sektörünün ana hammaddesi hâline gelmiştir (Shen vd., 2010). Ancak polyester ve benzeri petrol bazlı liflerin biyolojik olarak parçalanmaması, mikroplastik kirliliği gibi ciddi çevresel sorunları beraberinde getirmektedir (Henry vd., 2019).

Doğal liflerin çevresel etkilerinin daha düşük olduğu yönündeki yaygın algı, her zaman gerçeği yansıtmaz. Pamuk üretimi, yüksek su tüketimi ve pestisit kullanımı ile öne çıkan bir çevresel risk faktörüdür (ICAC, 2023). Yün üretimi ise metan salınımı ve toprak aşındırma gibi sorunlar yaratabilmektedir (FAO, 2022). Dolayısıyla, hangi hammaddenin “daha sürdürülebilir” olduğu sorusu, yalnızca kaynak kökenine değil, tüm yaşam döngüsüne bakılarak yanıtlanmalıdır.

6.2 Sektörel Zorluklar

Geri Dönüşüm Altyapısının Yetersizliği: Tekstil atıklarının büyük çoğunluğu (%87) yakılmakta veya çöplüklere gönderilmektedir (Ellen MacArthur Foundation, 2017). Mekanik ve kimyasal geri dönüşüm teknolojileri gelişmekle birlikte, lif ayırıştırma ve kalite korunumu hâlâ ciddi teknik zorluklar içermektedir.

Ekonomik Engeller: Sürdürülebilir hammaddeler genellikle daha yüksek maliyetlidir. Örneğin organik pamuk üretimi, verimlilik farkı ve sertifikasyon maliyetleri nedeniyle geleneksel pamuktan %20–50 daha pahalıdır (Textile Exchange, 2024).

Tüketici Davranışları: Hızlı moda alışkanlıkları, düşük fiyatlı ve kısa ömürlü ürün talebini artırarak sürdürülebilir üretim yatırımlarını ekonomik olarak dezavantajlı hâle getirmektedir (Joy vd., 2012).

Politika ve Düzenlemelerin Yetersizliği: AB ve bazı ülkeler tekstil atıkları ve geri dönüşüm hedefleri konusunda yasal çerçeveler geliştirse de, küresel ölçekte bağlayıcı bir sürdürülebilirlik standardı bulunmamaktadır (European Commission, 2022).

6.3 Fırsatlar ve Potansiyel Çözümler

Döngüsel Ekonomi Modelleri: Ürünlerin tasarım aşamasında geri dönüşüme uygun hammadde seçimi, modüler tasarım ve uzun ömürlü kullanım hedefleri sektörün dönüşümünde kritik öneme sahiptir (Ellen MacArthur Foundation, 2017).

Teknolojik Yenilikler: Biyoteknolojik lifler (ör. mikrobiyal selüloz, laboratuvar ortamında üretilen ipek proteinleri) ve gelişmiş kimyasal geri dönüşüm süreçleri, hammadde döngüsünü kapatmada güçlü araçlar sunmaktadır (RameshKumar vd., 2020).

Yasal Düzenlemeler: AB’nin “Sürdürülebilir Tekstil Stratejisi” gibi politika araçları, küresel standartlar için örnek teşkil edebilir. Zorunlu geri dönüşüm oranları ve karbon ayak izi etiketlemesi gibi uygulamalar yaygınlaştırılabilir.

Tüketici Bilincinin Artırılması: Eğitim kampanyaları ve şeffaf tedarik zinciri raporlamaları, tüketicilerin daha bilinçli seçimler yapmasını sağlayabilir. Moda

endüstrisinin “hikâye anlatımı” yöntemini, sürdürülebilirlik mesajları için kullanması bu noktada etkilidir.

6.4 Gelecek Perspektifi

Gelecekte tekstil hammaddelerinin kullanımında üç ana eğilimin öne çıkacağı öngörülmektedir:

1. **Hammadde Kaynaklarının Çeşitlenmesi:** Tekstil endüstrisinin yalnızca birkaç ana lif türüne bağımlılığı azalacaktır. Tarımsal atıklar (ör. ananas yaprağı lifi, muz lifi, kahve telvesi lifi) ve endüstriyel yan ürünlerden elde edilen lifler daha yaygın kullanılacaktır.
2. **Tam Döngüsel Üretim Modelleri:** “Fiber-to-fiber recycling” teknolojilerinin ticarileşmesi, atık tekstil ürünlerinin yüksek kaliteli yeni liflere dönüştürülmesini mümkün kılacaktır. Bu, özellikle polyester ve pamuk karışımlarının ayrıştırılması teknolojilerinin gelişmesiyle ivme kazanacaktır.
3. **Yerel ve Bölgesel Üretim:** Küresel tedarik zincirlerinin iklim değişikliği ve jeopolitik riskler nedeniyle kırılgan hale gelmesi, yerel hammadde üretimi ve kısa mesafeli tedarik zincirlerini teşvik edecektir.
4. **Veri Tabanlı Karar Alma:** Yaşam döngüsü analizleri (LCA) ve dijital ürün pasaportları gibi araçlar, üreticilerin ve tüketicilerin hammadde seçiminde şeffaf bilgiye dayalı kararlar almasını sağlayacaktır.

6.5 Araştırma Alanları ve Akademik Perspektif

Akademik alanda, sürdürülebilir tekstil hammaddeleri üzerine yapılan araştırmalar giderek disiplinler arası bir karakter kazanmaktadır. Malzeme bilimi, biyoteknoloji, endüstri mühendisliği, çevre bilimleri ve ekonomi disiplinlerinin ortak çalışmaları ile geliştirilen çözümler, laboratuvarlardan endüstriyel ölçeğe daha hızlı taşınabilmektedir (Blackburn, 2009).

Gelecek araştırmaların odaklanması gereken başlıca konular şunlardır:

- Düşük maliyetli ve yüksek performanslı geri dönüştürülmüş lif üretimi,
- Mikroplastik salınımını minimize eden sentetik lif tasarımları,
- Kurak iklimlerde su tüketimini azaltan doğal lif tarımı teknikleri,
- Biyobazlı liflerin mekanik dayanıklılığını artırma yöntemleri,
- Geri dönüşüm sürecinde lif kalitesini koruma stratejileri.

Genel olarak, tekstil sektörü önümüzdeki 20 yıl içinde hammaddeler açısından radikal bir dönüşüm yaşayacaktır. Bu dönüşümün hızı, teknolojik yeniliklerin ticarileşme başarısı, yasal düzenlemelerin küresel uyumu ve tüketici davranışlarındaki değişim ile belirlenecektir. Sektörün karşı karşıya olduğu ekolojik kriz, sürdürülebilirlik hedeflerini artık “seçenek” olmaktan çıkarıp “zorunluluk” haline getirmiştir.

7. SONUÇ

Tekstil sektöründe hammaddelerin dönüşümü, insanlık tarihinin teknik, toplumsal, kültürel ve ekonomik evrimleriyle iç içe ilerlemiştir. Doğal liflerle başlayan bu serüven, Sanayi Devrimi’nin getirdiği üretim devrimleriyle sentetik hammaddelere yönelmiş, 20. yüzyılın son çeyreğinde hızlı moda anlayışıyla daha da hız kazanmıştır. Bu hızlı dönüşüm, yalnızca üretim kapasitesini artırmamış; aynı zamanda çevresel, etik ve sosyal sorunları da beraberinde getirmiştir.

Kâr odaklı üretim sistemleri, düşük maliyetli sentetik materyalleri yaygınlaştırarak hammadde kullanımında tek taraflı bir yoğunlaşma yaratmıştır. Bu durum, su ve enerji tüketiminde artış, pestisit ve kimyasal kullanımında yoğunluk, atık oluşumunda patlama ve mikropplastik kirliliği gibi ekolojik tehditlerin yanı sıra, işçi hakları ihlalleri ve adaletsiz üretim koşulları gibi sosyal sorunları da derinleştirmiştir. Özellikle son on yılda artan kamuoyu baskısı, sivil toplum girişimleri ve uluslararası politika adımları, sektörü daha şeffaf, hesap verebilir ve sürdürülebilir üretim modellerine yöneltmiştir.

Bu dönüşüm arayışı, yalnızca teknik yeniliklere değil; kültürel ve davranışsal bir değişime de ihtiyaç duymaktadır. Geri dönüştürülmüş polyester (rPET), organik pamuk, kenevir ve biyoteknolojik lifler gibi yenilikçi hammaddeler, sürdürülebilir üretim zincirlerinin temel yapı taşları haline gelmektedir. Ancak bu materyallerin yaygınlaşabilmesi; teknolojik gelişmelerin hızına, maliyetlerin düşmesine, yasal çerçevelerin güçlenmesine ve tüketici tercihleriyle desteklenmesine bağlıdır.

Geleceğin tekstil sektöründe başarı ölçütü, yalnızca üretim hacmi ya da kârlılık olmayacaktır. Doğaya uyumluluk, etik üretim standartları, sosyal sorumluluk ve döngüsel ekonomi ilkeleri, rekabet avantajının temel belirleyicileri olacaktır. Sektörün bu dönüşüm yolculuğunda hem üreticiler hem tüketiciler aktif rol üstlenmeli; kısa vadeli kazançlar yerine uzun vadeli gezegen sağlığını önceleyen kararlar alınmalıdır.

Sonuç olarak, tekstil endüstrisinin hammaddeler konusundaki tercihlerinin geleceği, gezegenimizin sürdürülebilirliğiyle doğrudan bağlantılıdır. Bu bağ, yalnızca endüstriyel stratejilerle değil; bireysel tüketim alışkanlıklarımız ve toplumsal değerlerimizle de şekillenecektir. Bugün atılacak bilinçli adımlar, yarının hem moda dünyasını hem de dünya ekosistemini belirleyecektir. Geleceğin modası, yalnızca giydiklerimizde değil; onları nasıl, nerede ve hangi bedelle ürettiğimizde saklıdır.

KAYNAKÇA

- Barber, E. J. W. (1991). *Prehistoric textiles: The development of cloth in the Neolithic and Bronze Ages*. Princeton University Press.
- Beckert, S. (2014). *Empire of cotton: A global history*. Vintage.
- Blackburn, R. S. (2009). *Sustainable textiles: Life cycle and environmental impact*. Woodhead Publishing.
- Breward, C. (2003). *Fashion*. Oxford University Press.
- Chapman, S. D. (1972). *The cotton industry in the industrial revolution*. Macmillan.
- Costa, C., Azoia, N. G., Silva, C., Marques, E. F. (2020). Textile Industry in a Changing World: Challenges of Sustainable Development. *U. Porto Journal of Engineering*, 6(2):86-97.
- Ellen MacArthur Foundation. (2017). *A new textiles economy: Redesigning fashion's future*. Ellen MacArthur Foundation.
- European Commission. (2022). *EU strategy for sustainable and circular textiles*. European Union.
- FAO. (2022). *World fibre production and use*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fashion Revolution. (2023). *Fashion transparency index 2023*. Fashion Revolution.
- Fletcher, K., & Tham, M. (2019). *Earth logic: Fashion action research plan*. The JJ Charitable Trust.
- Gereffi, G., & Frederick, S. (2010). The global apparel value chain, trade and the crisis. *World Bank Policy Research Working Paper*.
- Good, I. (2017). Textiles: Production, trade and demand. In *The Cambridge world history*. Cambridge University Press.
- Henry, B., Laitala, K., & Klepp, I. G. (2019). Microfibres from apparel and home textiles: Prospects for including microplastics in environmental sustainability assessment. *Science of the Total Environment*, 652, 483–494.
- Horrocks, A. R., & Anand, S. C. (2016). *Handbook of technical textiles*. Woodhead Publishing.
- Hounshell, D. A., & Smith, J. K. (1988). *Science and corporate strategy: DuPont R&D, 1902–1980*. Cambridge University Press.
- ICAC. (2023). *Cotton water footprint analysis*. International Cotton Advisory Committee.

- Joy, A., Sherry, J. F., Jr., Venkatesh, A., Wang, J., & Chan, R. (2012). Fast fashion, sustainability, and the ethical appeal of luxury brands. *Fashion Theory*, 16(3), 273–295.
- Kadolph, S. J. (2014). *Textiles* (11th ed.). Pearson Higher Ed.
- Kant, R. (2012). Textile dyeing industry an environmental hazard. *Natural Science*, 4(1), 22–26.
- Munro, J. H. (2003). Medieval woollens: Textiles, technology and organisation. In *The Cambridge history of western textiles* (Vol. 1, pp. 181–227). Cambridge University Press.
- Niinimäki, K., Peters, G., Dahlbo, H., Perry, P., Rissanen, T., & Gwilt, A. (2020). The environmental price of fast fashion. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(4), 189–200.
- RameshKumar, S., Shaiju, P., O'Connor, K. E. (2020). Bio-based and biodegradable polymers-State-of-the-art, challenges and emerging trends. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 21, 75–81.
- Riello, G. (2013). *Cotton: The fabric that made the modern world*. Cambridge University Press.
- Shen, L., Worrell, E., Patel, M. (2010). Environmental impact assessment of man-made cellulose fibres. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(3), 260–274.
- Textile Exchange. (2024). *Materials market report 2024*. Textile Exchange.
- UNCTAD. (2023). *Trends in natural and man-made fibres trade*. United Nations Conference on Trade and Development.
- Zhao, F. (2012). *Chinese silks*. Yale University Press.



BÖLÜM 9

Sentinel- 1 Radar Verisi ile Savaş Sonrası Yapı Hasar Tespiti: Maripol Örneği

Gizem Eyi¹ & İlkey Buğdaycı²

GİRİŞ

Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), günümüzde doğal afetlerden çevresel değişikliklere, kent planlamasından tarımsal faaliyetlere kadar geniş bir yelpazede kullanılan güçlü teknolojilerdir. Bu teknolojiler, belirli bir bölgedeki fiziksel değişikliklerin uzaktan takibini yaparak, verilerin toplanmasını ve analiz edilmesini sağlamaktadır (Aboelsoud vd., 2022; Afaq & Manocha, 2021; Aghayev, 2018; Das & Angadi, 2024; Dos, 2022; Malmgren-Hansen, Sohnesen, Fisker, & Baez, 2020; Siraj, Mahmood, & Habib, 2023).

Uzaktan algılama, uydu veya hava araçlarından elde edilen görüntülerle yeryüzündeki nesneleri tanımlama ve analiz etme imkânı sunarken, CBS bu veriler ile mekânsal analizler yapmaya olanak tanımaktadır (Afaq & Manocha, 2021; Aghayev, 2018; Das & Angadi, 2024; Paul, 2022). Özellikle doğal felaketler, şehirleşme, iklim değişiklikleri ve savaşlar gibi olayların etkilerini analiz etmek ve görselleştirmek için uzaktan algılama ve CBS sıkça kullanılmaktadır (Afaq & Manocha, 2021; Aimaiti, Sanon, Koch, Baise, & Moaveni, 2022; Cho, Xiu, & Matsuoka, 2023; Dos, 2022; Li, Wang, Zhang, Wu, & Zheng, 2023; Malmgren-Hansen vd., 2020).

Mekânsal değişimin izlenmesi, bu teknolojilerin en yaygın kullanıldığı alanlardan biridir (Afaq & Manocha, 2021; Das & Angadi, 2024; Malmgren-Hansen vd., 2020). Bu tür olaylarda, yapıların zarar görmesi, çevresel bozulma ve altyapıdaki hasarları tespit etmek ve bu etkilerin mekânsal dağılımını analiz etmek, uzaktan algılama verilerinin doğru sınıflandırılması ile mümkün hale gelmektedir. Uzaktan algılama teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte, backscatter analizi, mekânsal analizlerde önemli bir araç haline gelmiştir (Cho vd., 2023).

Değişim analizi ise çevresel olayların etkilerini anlamak için kullanılan güçlü bir yöntemdir (Afaq & Manocha, 2021; Malmgren-Hansen vd., 2020). Bu analiz yaklaşımı, özellikle savaş ve afetler gibi insan kaynaklı veya doğal yıkımların

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

izlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır (Aimaiti vd., 2022; Boloorani, Darvishi, Weng, & Liu, 2021; Siraj vd., 2023; Yakymchuk, Byrkovych, & Kuzmych, 2023). Değişim analizi kapsamında ilk olarak değişim yüzdesi hesaplanmaktadır. Bu hesaplama, belirli yapı türlerinde meydana gelen değişimleri sayısal olarak ifade ederek, örneğin hasarlı yapıların savaş öncesi sağlam yapı sayısına oranını ortaya koymaktadır.

Ukrayna-Rusya Savaşı'nın başlamasıyla birlikte, şehir altyapısında meydana gelen yıkımların tespiti ve mekânsal analizi, karar vericiler ve uluslararası kamuoyu için önemli bir ihtiyaç haline gelmiştir. Bu tür analizlerin yapılmasında, hava koşullarından ve gün ışığından bağımsız çalışabilme avantajı nedeniyle Sentinel-1 radar verisi dikkat çekmektedir. Sentinel-1, Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından geliştirilen ve Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) taşıyan bir uydu sistemidir. Optik görüntüleme sistemlerinin aksine, SAR verileri bulut örtüsünden etkilenmeden gece ve gündüz veri sağlayabilir. Bu özelliği, özellikle savaş bölgeleri gibi kriz alanlarında sürekli ve güvenilir bilgi elde etmek için büyük avantaj sağlamaktadır.

Bu çalışmada kullanılan backscatter değeri, radar sinyalinin yüzeyle etkileşimi sonucu geri saçılan enerjiyi ifade etmektedir. Yüzeyin nem içeriği, pürüzlülüğü ve yapısal bütünlüğü gibi özellikler, bu değeri doğrudan etkilemektedir. Dolayısıyla, binaların savaş öncesi ve sonrası backscatter değerleri arasındaki farklar, yapısal değişikliklerin (yani yıkım veya hasar) belirlenmesinde temel gösterge olarak kullanılmaktadır. Yapılan analizlerde belirli bir eşik değeri (threshold = 1) üzerindeki değişimler, olası hasar alanları olarak sınıflandırılmıştır.

Bu çalışmanın amacı, Ukrayna'nın Mariupol şehrinde savaş öncesi ve sonrası Sentinel-1 radar verileri kullanılarak bina türlerine göre mekânsal hasar dağılımını ortaya koymak, bu verileri sayısal ve grafiksel olarak yorumlamak ve harita tabanlı görselleştirmeler ile sunmaktır.

Literatürde, SAR verilerinin savaş bölgelerinde kullanımı son yıllarda artış göstermiştir (Aimaiti vd., 2022; Boloorani vd., 2021). Özellikle 2022 sonrası yapılan çalışmalarda, Sentinel-1 backscatter fark analizleri ile kent içi hasar tespiti başarıyla gerçekleştirilmiştir (Cho vd., 2023). Ancak bu çalışmalarda çoğunlukla genel hasar dağılımı ele alınmış, bina sınıfına göre detaylı mekânsal analizler sınırlı kalmıştır. Bu bağlamda bu çalışma, literatüre bina sınıfı bazlı bir SAR analizi sunarak katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

YÖNTEM

1. Çalışma Alanı

Mariupol, Ukrayna'nın doğu kesiminde, Azak Denizi'nin kıyısında yer alan stratejik bir liman kentidir. Türkiye'ye göre kuzeydoğuda, Karadeniz'in kuzeydoğusunda ve yaklaşık 1.000 km mesafede bulunan şehir, Ukrayna'nın jeopolitik açıdan kritik öneme sahip bölgelerinden biridir. Coğrafi olarak 47°05'K enlem ve 37°33'D boylamda yer alan Mariupol, Karadeniz ile Azak Denizi arasındaki deniz ulaşımının kavşak noktalarından biri olarak deniz ticareti ve lojistik açıdan stratejik bir konumdadır (Çalışkan, 2022).

Şehir düz ve hafif engebeli alanlardan oluşurken geniş tarım arazileri ile sanayi bölgeleri iç içe geçmiştir. Mariupol'un kıyı hattı, liman tesisleri ve endüstriyel yapılarla yoğun şekilde kullanılırken, şehir çevresinde yer alan büyük sanayi tesisleri, özellikle metalurji endüstrisi açısından önemlidir. Şehir, Ukrayna'nın en büyük demir-çelik üretim merkezlerinden biri olup, Mariupol Metalurji Fabrikası gibi büyük sanayi komplekslerine ev sahipliği yapmaktadır. Bu durum, şehrin hem ulusal hem de uluslararası ticaret açısından önemli bir sanayi ve lojistik merkezi olmasını sağlamıştır (Çalışkan, 2022).

Mariupol'un stratejik önemi sadece ekonomik ve sanayi boyutuyla sınırlı değildir. Şehir, Rusya'nın Ukrayna üzerindeki siyasi ve askeri etkisi açısından da kritik bir role sahiptir. Azak Denizi kıyısında yer alması ve Rusya sınırına yakınlığı, kenti 2022 yılında başlayan Rusya-Ukrayna Savaşı'nın en önemli hedeflerinden biri haline getirmiştir. Savaş sırasında, özellikle şehrin altyapısı, sanayi bölgeleri ve konut alanları yoğun bombardıman ve çatışmalar nedeniyle ciddi hasar görmüştür. Bu büyük yıkım, şehrin ticari yaşamını büyük ölçüde etkilemiştir.



Şekil 1: Türkiye-Ukrayna-Rusya'ya göre Mariupol şehrinin konumunu gösteren Google Earth görüntüsü

2. Veri Seti

Bu çalışmada, Ukrayna'nın Mariupol şehri ve çevresinde meydana gelen yapısal değişimleri analiz etmek amacıyla Sentinel-1A uydusuna ait iki farklı tarihte elde edilmiş GRDH (Ground Range Detected, High Resolution) tipinde SAR (Sentetik Açıklıklı Radar) görüntüleri kullanılmıştır. Bu verilerden biri savaş öncesi (8 Ağustos 2021), diğeri ise savaş sonrası (10 Ağustos 2023) tarihine aittir. Her iki görüntüde de ascending orbit, IW modu ve VV polarizasyon kullanılmış olup analizlerin tutarlılığını sağlamak amacıyla aynı yörüngeden alınmış veriler tercih edilmiştir.

Tablo 1: Sentinel-1A görüntüleri özellikleri

Özellik	2021 Verisi	2023 Verisi
Uydu	Sentinel-1A	Sentinel-1A
Tarih	8 Ağustos 2021	10 Ağustos 2023
Orbit Yönü	Ascending	Ascending
Mod	IW (Interferometric Wide)	IW (Interferometric Wide)
Ürün Tipi	GRDH (High Resolution)	GRDH (High Resolution)
Polarizasyon	VV & VH (Analiz için VV tercih edilmiştir)	VV & VH (Analiz için VV tercih edilmiştir)
İşlenme Seviyesi	Level-1	Level-1
Veri Boyutu	1657 MB	1657 MB
Alan	Mariupol ve çevresi	Mariupol ve çevresi

Backscatter analizine uygun olan bu veriler, radar dalgalarının yüzeyden geri yansıma gücünü temsil eder. Bu sayede, yapı yoğunluğu, su varlığı, bina yıkımı gibi fiziksel değişiklikler tespit edilebilir.

3. Kullanılan Yazılımlar

SNAP (Sentinel Application Platform), Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından geliştirilmiş, özellikle Sentinel verilerinin işlenmesi için kullanılan açık kaynaklı bir yazılımdır. Bu çalışmada SNAP yazılımı, SAR (Sentinel-1) verilerinin ön işleme adımları için tercih edilmiştir. Sentinel-1 verileri, optik görüntülerin aksine SAR formatındadır ve bu görüntülerden sağlıklı analizler yapabilmek için özel işleme adımlarından geçirilmesi gerekir. SNAP, bu işlemleri destekleyen en güvenilir ve akademik açıdan kabul görmüş araçlardan biridir.

SNAP'ın başlıca kullanım amaçları, SAR görüntülerinin radyometrik olarak düzeltilmesi (kalibrasyon), radar görüntülerinde sıkça görülen “speckle” (tuz-biber) gürültüsünün filtrelenmesi (Speckle Filtrelemesi), görüntünün coğrafi olarak düzeltilmesi ve koordinat sistemi ile hizalanması (Arazi Düzeltmesi) olarak gösterilebilir.

ArcGIS, coğrafi veri analizi, görselleştirme ve mekânsal karar destek sistemleri için yaygın olarak kullanılan güçlü bir CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) yazılımıdır. Bu çalışmada SNAP'te işlenen SAR görüntüleri daha sonra ArcGIS ortamına aktarılmış ve burada detaylı analizler gerçekleştirilmiştir. Backscatter analizi kapsamında SNAP'te işlenen .tif uzantılı rasterlar ArcGIS'e aktararak VV polarizasyonuna göre yansıma değerleri analiz edilmiştir. Radar sinyallerinin yüzeyden geri yansıması olan backscatter, yapı yoğunluğu ve değişimi hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Hasarlı alanlar, düşük geri saçılma değeri gösterirken, yoğun yapılar yüksek geri saçılma göstermektedir. Tamamen yıkılmış alanlarda ise backscatter değeri önemli ölçüde düşmektedir. Bu çalışmada backscatter analizi hasarlı bölgelerin tespitinde kritik bir rol oynamıştır. Bu bağlamda, 2021 ve 2023 verileri arasındaki geri saçılma farkı incelenerek, savaşın oluşturduğu fiziksel tahribat mekânsal olarak haritalanmış ve sayısal olarak ölçülmüştür.

Son olarak 2021 ve 2023 raster görüntüleri piksel bazlı olarak karşılaştırılarak, savaşın neden olduğu fiziksel hasar değişim analizi kapsamında tespit edilmiştir. Raster fark görüntüsü sınıflandırılarak hangi alanların yüksek hasar aldığı yine ArcGIS ortamında belirlenmiş ve haritalandırılmıştır.

BULGULAR

Bu çalışmada kullanılan Sentinel-1 radar verileri, optik uydu görüntülerine göre önemli avantajlar sağlamaktadır. Özellikle SAR verileri bulut, sis, duman gibi atmosferik engellerden etkilenmediği için savaş bölgeleri gibi kaotik ortamlarda güvenilir sonuçlar vermektedir. SAR verileri gece-gündüz fark etmeden veri toplayabildiğinden, SAR sinyalleri yüzeydeki fiziksel ve yapısal değişimleri tespit etmeye uygundur. Bu sayede optik görüntülerin yetersiz kaldığı koşullarda, binalardaki deformasyon ya da yıkım net bir şekilde belirlenmiştir.

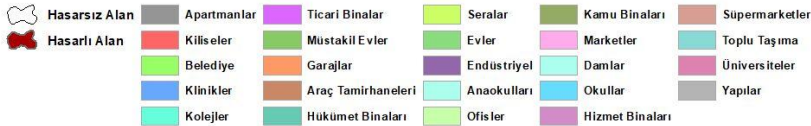
Sentinel-1 SAR uydu verileri ile oluşturulan backscatter fark rasteri, Mariupol kentindeki yapısal hasarın mekânsal dağılımını ortaya koymak amacıyla kullanılmıştır. Analizde kullanılan yöntemle, savaş öncesi ve sonrası SAR görüntüleri arasındaki fark hesaplanmış; bu farkın 1'in üzerinde olduğu alanlar “hasarlı alan” olarak tanımlanmıştır.

Elde edilen raster görüntüsüne göre, şehir merkezinde yer alan yapıların yoğunlukla bulunduğu bölgeler ciddi hasar almıştır. Özellikle çok katlı konut alanları, liman çevresi ve ana ulaşım akslarına yakın bölgelerde belirgin hasar izleri gözlemlenmiştir. Merkezin dışında, tarım arazileri ile çevrili alanlarda bulunan izole binalarda ise sınırlı düzeyde yıkım tespit edilmiştir.

Bu analiz, hasarın kentsel merkezde yoğunlaştığını ve altyapı ile yerleşim dokusunun büyük ölçüde etkilendiğini göstermektedir. Backscatter fark rasteri görselleştirmesi Şekil 2’de sunulmuştur. Kırmızı tonlar, fiziksel yıkımın en yoğun olduğu alanları temsil etmektedir.



Şekil 2: Mariupol Merkez bölgesindeki backscatter analizi sonuç görüntüsü,



Şekil 3: Backscatter analizi sonuç görüntüsü lejanti

OpenStreetMap üzerinden elde edilen bina ve mahalle verileri, backscatter fark rasteri ile karşılaştırılarak her bir bina için hasar değeri hesaplanmıştır. Ardından binalar sınıflandırılarak, her bir bina türü için hasar yüzdesi belirlenmiştir. Tablo 2’de bu sınıflara ait hasar oranları gösterilmektedir.

Tablo 2: Sınıflara göre hasar yüzdeleri

Sınıf	Hasar Yüzdesi	Sınıf	Hasar Yüzdesi
Okullar	0,00%	Hükümet Binaları	0,00%
Yapılar	5,11%	Damlar	0,00%
Apartmanlar	1,54%	Evler	3,26%
Üniversiteler	0,00%	Ofisler	0,00%
Kamu Binaları	0,00%	Kiliseler	0,00%
Toplu Taşıma	100,00%	Marketler	0,00%
Endüstriyel	15,27%	Süpermarketler	0,00%
Anaokulları	5,00%	Klinikler	0,00%
Kolejler	0,00%	Hizmet Binaları	0,00%
Seralar	0,00%	Müstakil Evler	6,41%
Ticari Binalar	0,00%	Garajlar	0,00%
Araç Tamirhaneleri	1,16%	Belediye	0,00%

Bu sonuçlara göre, en yüksek hasar oranı %100 ile toplu taşıma altyapısında görülmüştür. Bunu %15,27 ile endüstriyel yapılar ve %6,41 ile müstakil evler takip etmektedir. Konut tipi binalar genel olarak %1,5 ila %5 arasında hasar almış görünmektedir. Özellikle liman bölgesindeki endüstriyel yapılarda ve şehir merkezindeki bazı apartman bloklarında yoğun yıkım tespit edilmiştir.

Görsel analizlerde, yakınlştırılmış görüntülerle bu bölgelerdeki yıkım ayrıntılı biçimde gözlemlenmiştir (Şekil 4, 5, 6, 7, 8, 9). Ayrıca, yapı türlerine göre dağılımı görselleştiren grafiksel bir sunum da hazırlanmış ve Şekil 10’da verilmiştir.



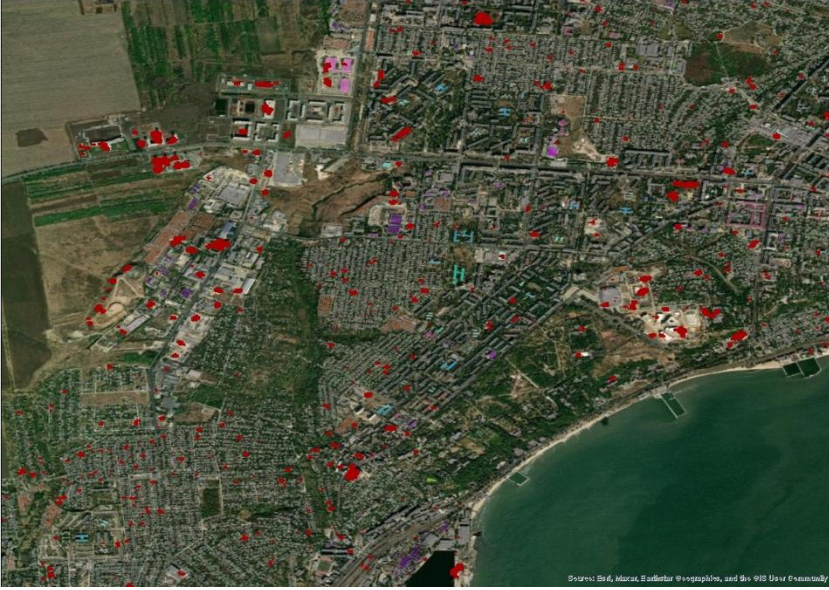
Şekil 4: Mariupol Merkez bölgesindeki endüstriyel alanın yakınlaştırılmış backscatter analizi sonuç görüntüsü



Şekil 5: Mariupol Merkez bölgesindeki yapıların yakınlaştırılmış backscatter analizi sonuç görüntüsü



Şekil 6: Mariupol Merkez bölgesindeki liman ve liman çevresindeki endüstriyel alanın yakınlaştırılmış backscatter analizi sonuç görüntüsü



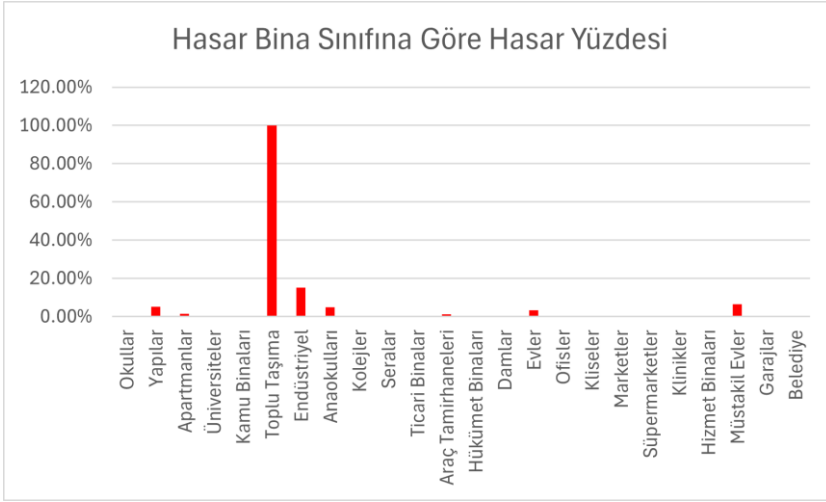
Şekil 7: Mariupol Merkez bölgesindeki yapıların yakınlaştırılmış backscatter analizi sonuç görüntüsü



Şekil 8: Mariupol Merkez bölgesindeki endüstriyel alanın yakınlaştırılmış backscatter analizi sonuç görüntüsü



Şekil 9: Mariupol Merkez bölgesindeki endüstriyel alanın yakınlaştırılmış backscatter analizi sonuç görüntüsü



Şekil 10: Yapı türlerine göre hasar dağılımı grafiği

SONUÇ

Backscatter fark rasteri ve görsel incelemeler sonucunda, **en fazla hasarın** Mariupol şehir merkezinde ve liman çevresinde yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Bu bölgelerde hem çok katlı konutlar hem de endüstriyel yapılar yer almakta olup, yoğun yerleşim ve stratejik öneme sahip altyapılar bu alanları hedef haline getirmiş olabilmektedir. Özellikle liman bölgesi, askeri ve ekonomik açıdan önemli bir nokta olduğundan, çatışmaların odak noktası olmuş ve bu durum fiziksel tahribatın artmasına neden olmuştur.

Sınıf bazlı analizlerde, toplu taşıma yapısında %100 hasar oranı tespit edildiğinden, istasyonlar, duraklar veya raylı sistem yapılarının ciddi şekilde etkilendiği söylenebilmektedir. Ayrıca endüstriyel yapılardaki % 15,27 oranında hasar, üretim ve lojistik alanlarının ciddi zarar aldığını göstermektedir. Müstakil evlerdeki %6,41 ve apartmanlarda gözlenen %1,54 oranındaki hasar arasındaki fark, yapı yoğunluğu ve konum ile ilişkilendirilmektedir. Eğitim, sağlık ve kamu hizmet binalarının büyük çoğunluğunda hasar tespit edilmemiştir. Bunun nedeni, bu yapıların konum itibarıyla çatışmalardan daha uzak bölgelerde yer alması veya radar sinyaline duyarlılığın düşük olması olduğu düşünülmektedir. Bu değerlendirmeler, farklı bina türlerinin savaş ortamındaki kırılganlık düzeyini anlamaya katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmada kullanılan yöntem, radar tabanlı değişim tespiti ile mekânsal vektör verilerini birleştirerek yüksek doğrulukta hasar analizine olanak sağlamaktadır. Ancak yöntemin bazı sınırlılıkları da bulunmaktadır. Radar verisi yapısal değişimi göstermektedir fakat değişim sebebinin açıklayamamaktadır. Yani bir binadaki backscatter değişimi yıkım kaynaklı mı, farklı bir yüzey değişikliği mi doğrudan anlaşılamamaktadır. Vektör verileri (OpenStreetMap)

gönüllü kullanıcılar tarafından oluşturulduğundan, bina türleri ve konumlarının doğruluğu hakkında kesin bir kaniya varılamamaktadır. Ayrıca SAR verilerinin mekânsal çözünürlüğü sınırlı olduğundan, küçük ölçekli hasarlar gözden kaçabilmektedir.

Tüm bu sınırlılıklara rağmen, veri temelli, sistematik ve yeniden üretilebilir bir yöntem sunulmuştur. Özellikle yüksek çözünürlüklü SAR verileri ve güncel vektör katmanları ile bu analiz daha da geliştirilebilir olduğu düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

- Aboelsoud, H. M., AbdelRahman, M. A. E., Kheir, A. M. S., Eid, M. S. M., Ammar, K. A., Khalifa, T. H., & Scopa, A. (2022). Quantitative Estimation of Saline-Soil Amelioration Using Remote-Sensing Indices in Arid Land for Better Management. *Land*, 11(7), 1041. <https://doi.org/10.3390/land11071041>
- Afaq, Y., & Manocha, A. (2021). Analysis on change detection techniques for remote sensing applications: A review. *Ecological Informatics*, 63, 101310. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101310>
- Aghayev, A. (2018). Determining of different inundated land use in Salyan plain during 2010 the Kura River flood through GIS and remote sensing tools. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 3(3), 80-86. <https://doi.org/10.26833/ijeg.412348>
- Aimaiti, Y., Sanon, C., Koch, M., Baise, L. G., & Moaveni, B. (2022). War Related Building Damage Assessment in Kyiv, Ukraine, Using Sentinel-1 Radar and Sentinel-2 Optical Images. *Remote Sensing*, 14(24), 6239. <https://doi.org/10.3390/rs14246239>
- Bolloorani, A. D., Darvishi, M., Weng, Q., & Liu, X. (2021). Post-War Urban Damage Mapping Using InSAR: The Case of Mosul City in Iraq. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(3), 140. <https://doi.org/10.3390/ijgi10030140>
- Cho, S., Xiu, H., & Matsuoka, M. (2023). Backscattering Characteristics of SAR Images in Damaged Buildings Due to the 2016 Kumamoto Earthquake. *Remote Sensing*, 15(8), 2181. <https://doi.org/10.3390/rs15082181>
- Çalışkan, F. (2022). Adım Adım Rusya Ukrayna Savaşı ve Üçüncü Tarafların Sürece Etkisi. *EURO Politika*, (14), 35-47.
- Das, S., & Angadi, D. P. (2024). Land use land cover change detection and monitoring of urban growth using remote sensing and GIS techniques: A micro-level study | Request PDF. *GeoJournal*, 1-23. <https://doi.org/10.1007/s10708-020-10359-1>
- Dos, M. E. (2022). Determination of city change in satellite images with deep learning structures. *Advanced Remote Sensing*, 2(1), 16-22.
- Li, T., Wang, C., Zhang, H., Wu, F., & Zheng, X. (2023). DDFormer: A Dual-Domain Transformer for Building Damage Detection Using High-Resolution SAR Imagery. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 20, 1-5. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2023.3288007>
- Malmgren-Hansen, D., Sohnesen, T., Fisker, P., & Baez, J. (2020). Sentinel-1 Change Detection Analysis for Cyclone Damage Assessment in Urban

Environments. *Remote Sensing*, 12(15), 2409.
<https://doi.org/10.3390/rs12152409>

Paul, S. (2022). Change detection and future change prediction in Habra I and II block using remote sensing and GIS – A case study. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 7(2), 191-207.
<https://doi.org/10.26833/ijeg.975222>

Siraj, M., Mahmood, S., & Habib, W. (2023). Geo-spatial assessment of land cover change in District Dera Ismail Khan, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *Advanced Remote Sensing*, 3(1), 1-9.

Yakymchuk, A., Byrkovych, T., & Kuzmych, S. (2023, Ekim 2). *Monitoring, Assessment and Administration of War Consequences and Post-War Reconstruction: Remote Sensing and GIS Economical Approaches*. 2023(1), 1-5. European Association of Geoscientists & Engineers.
<https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023510056>



BÖLÜM 10

Yeşil Enerji Üretiminde İlerlemeler ve Yakıt Hücreleri İçin Yenilikçi Malzemeler

Gamze Gündüz Meriç¹

1. GİRİŞ

Doğadaki mevcut potansiyel enerjilerin toplanması, enerji talebini azaltmak ve küresel ısınmaya çözüm bulmak için alternatif bir yaklaşım olmuştur (Ni vd., 2023). Rüzgâr, hidro, güneş, okyanus ve jeotermal yenilenebilir enerji kaynaklarının hiçbirinin küresel enerji piyasasında tek başına baskın enerji kaynağı olarak kabul edilemeyeceği görülmektedir (Fan vd., 2021). Birleşik teknolojiler yenilenebilir kaynakların mevcudiyetinden, depolama ve diğer tekniklerin potansiyelinden faydalanacaktır. Yakıt hücresi (YH) teknolojisi, çeşitli uygulamalarda belirtilen sorunlara bir çözüm olarak enerji üretiminin karma modellerinde önemli bir rol oynayabilmektedir. YH'ler, Carnot çevrimi etkisiyle kısıtlanmadan, yaygın motorlara göre daha yüksek verimlilikte çalışma kabiliyeti ve hareketli parça bulunmaması nedeniyle de düşük gürültü sunmaktadır (Pan vd., 2013). Bu teknoloji, taşınabilir cihazlardan güç istasyonlarına kadar çeşitli potansiyel uygulamalar ve güç kaynağı aralığı (10 W–100 MW) (Sazali vd., 2020) ve kendi kendine yeten bir işleve sahip olması (Shah vd., 2019) açısından da benzersizdir. YH'ler, önceki nesil hidro, rüzgar, güneş ve atom reaktörlerinden sonra dördüncü nesil enerjinin bir parçası olarak kabul edilmektedirler (Sun ve Sun, 2020). Pillerle karşılaştırıldığında, yakıt potansiyel olarak daha düşük bakım maliyetiyle sağlandığı sürece kesintisiz olarak daha uzun süre çalışır (Tawalbeh vd., 2024). YH cihazı aynı zamanda yakıt ve oksitleyici mevcut olduğu sürece yakıtta depolanan kimyasal enerjiyi sürekli olarak elektrik enerjisine dönüştüren bir elektrokimyasal hücre veya jeneratördür (Javed vd., 2022). YH'ler, besleme türüne, iyon taşınımının işlevsel mekanizmasına, çalışma sıcaklığına ve elektrolitin türüne ve fiziksel durumuna göre farklı şekilde sınıflandırılabilirler. Genellikle düşük, orta ve yüksek sıcaklıklar olmak üzere üç gruba ayrılırlar. Polimerik elektrolitler ve alkali YH'ler düşük sıcaklıklarda (40–100 °C) (Wang vd., 2022) çalışırken, asidik elektrolit (fosforik asit) orta sıcaklıkta (120–200 °C) (Sun ve Sun, 2020) çalışır. Karbonat ve katı oksit elektrolit (SOE) YH'ler gibi erimiş tuzlar yüksek sıcaklık kategorilerine (600–1000 °C) aittir (Al-Othman vd., 2021). Hidrojen (Lin vd.,

¹ Doç. Dr., Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0001-9487-4267

2019), biyogazlar, metanol ve etanol gibi alkoller (Visser vd., 2023), tesis atıkları, hidrokarbon (Zhang vd., 2022) ve atık su (Obasi ve Ajah, 2016), yakıt hücrelerinin çalıştığı hammadde türleridir. Bunlar arasında hidrojenin, amonyak, metanol ve petrol üretimi için endüstriyel hammadde olarak kimyasal kullanımının yanı sıra, geleneksel petrol kükürt giderme ve rafinasyonu için yeni nesil temiz enerji üretimi yakıtı olması beklenmektedir (Bodkhe vd., 2023). Hidrojen, YH'lerde elektrik üretmek için yakıt olarak veya doğrudan bir ısı kaynağı olarak kullanılabilir (Murugan ve Brown, 2015). Hidrojen YH'leri (HYH'ler), hidrojeni oksijenle birleştirerek elektrik, su ve ısı üretirler. HYH'ler, hidrojenin toksik ve aşındırıcı olmayan doğasından, yüksek enerji verimliliğinden, sıfır karbondioksit (CO₂) emisyonundan ve coğrafi enerji güvenliği sağlayan kaynak esnekliğinden faydalanırlar (Sun ve Sun, 2020). Bu nedenle HYH'ler, sözde hidrojen ekonomisinin avantajlarını YH'lerle senkronize eden temiz, yeşil ve sürdürülebilir enerji üretiminde en umut verici teknolojilerden birisidir.

Evrendeki en yaygın element olan hidrojen (%75), dünyada ayrı bir element olarak serbest halde bulunmaz (Fan vd., 2021). HYH'ler için hidrojen bulunabilirliği ayrıca üretim yöntemi ve maliyeti, güç kaynağı, teslimat ve dağıtım dahil altyapı ve yangınlık için güvenli boru hatları tarafından belirlenir (Wang vd., 2022). Bir HYH'nin ömrü, kullanılan hidrojenin saflığı tarafından büyük ölçüde kontrol edilir, nano molar (nM) safsızlık seviyeleri HYH'nin katalizörünün bozulmasına neden olur (Murugan ve Brown, 2015). Hidrojen üretim yöntemleri ve YH'lerde kullanılan malzemeler, bu teknolojiyle enerji talebini karşılamada zorluk yaratmaktadır. Bu çalışmanın ana odağı, hidrojen üretim yaklaşımları ve YH'lerde kullanılan malzemeler açısından yeşil YH'lerdir.

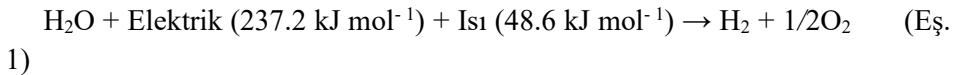
2. Yeşil Hidrojen Teknolojisi Yaklaşımları

Hidrojen, salınan CO₂ miktarına ve yenilenebilirliğine bağlı olarak hidrojen türünü (gri, mavi ve yeşil) belirleyen birçok yaklaşımla üretilir. Önemli CO₂ emisyonuna sahip olan ve en çok kullanılan yöntem olan gri hidrojen, şu anda fosil yakıtların dönüştürülmesiyle (örneğin buhar reformu) üretilmektedir (Rosero-Chasoy vd., 2023). Üretilen CO₂'nin yakalandığı veya dönüştürüldüğü fosil bazlı yöntemlerle elde edilen hidrojene mavi denir. Sıfır karbonlu bir geleceğe doğru ilerlerken, dünyada hidrojen üretimi gri ve mavi teknolojilerden yeşil teknolojilere kaymaktadır. Yeşil hidrojen, sıfır CO₂ salan ve yenilenebilir malzeme kaynaklarıyla beslenen yaklaşımlarla üretilmektedir (Panchenko vd., 2023). Hidrojen üretim yöntemleri, su ve metanol gibi hidrojen içeren kimyasalların parçalanması ve ürünlerinin biyohidrojen olarak adlandırıldığı iki ana grubu içermektedir. Kimyasalların su yerine parçalanması daha az enerji

gerektirse de, yan ürün olarak CO₂ ve gri veya mavi hidrojen elde edilmesiyle sonuçlanır (Dincer, 2012). Dolayısıyla,"parçalama" terimi suyun parçalanması anlamına gelmektedir. Elektrokimyasal (elektroliz), fotoelektrokimyasal, fotobiyolojik ve termokimyasal su parçalanması, yeşil hidrojen üreten parçalama yönteminin alt grupları olarak düşünülebilmektedir. Biyohidrojen tipik olarak biyokütleler, biyolojik atıklar ve belediye çamuru gibi yenilenebilir hammaddelerden elde edilmektedir (Rajesh vd., 2021). Biyokimyasal yöntemler, mikrobiyal elektroliz ve termokimyasal yollar, bahsedilen beslemelerden hidrojen üretiminin üç ana biyo-yaklaşımıdır. Doğrudan ve dolaylı biyo-fotosentez, karanlık ve foto-fermantasyon biyokimyasal yöntemlerden türetilmiştir (Samrot vd., 2023). Biyokütlelerin gazlaştırılması, pirolizi, yanması ve sıvılaştırılması termokimyasal yolların alt gruplarıdır (Tawalbeh vd., 2021). Bu biyo-yaklaşımlar arasında, doğrudan biyo-fotosentez ve piroliz, net sıfır CO₂ emisyonlu yeşil hidrojen sağlamaktadır (Hosseini ve Wahid, 2016). Başka bir bakış açısına göre, yeşil hidrojen, CO₂ yaysa da yaymasa da, yenilenebilir enerji kaynağının kullanıldığı yollarla üretilen hidrojen olarak anılmaktadır (Dincer, 2012). Bu bölümde, hızla büyüyen kimya endüstrisine ve sürdürülebilir ve temiz enerji talebine bir çözüm olarak yeşil hidrojen üretimi için şimdiye kadar geliştirilen teknolojiler incelenmektedir.

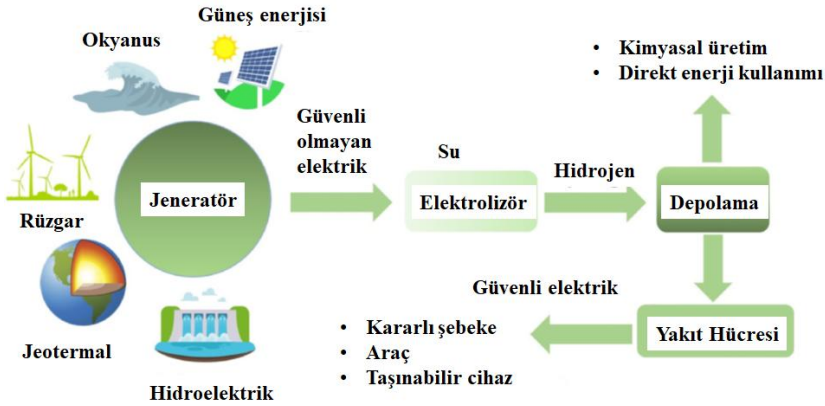
2.1. Elektroliz

Elektrokimyasal işlemle suyun ayrıştırılması, yani elektroliz, yeşil hidrojen üretimi (GHP) için kapsamlı olarak araştırılan karbonsuz teknolojilerden birisidir. Bir elektrolizör, bir elektrolit veya membran ile daldırılmış veya elektriksel olarak bağlanmış iki elektrottan (katot ve anot) oluşan bir birim hücredir (Pushkareva vd., 2020). Hidrojen (H₂) ve oksijen (O₂), elektroliz elektrolitinden elektrik geçişi yoluyla üretilir (Kumar ve Lim, 2022). Oksijen çıkış reaksiyonu (OER) ve hidrojen çıkış reaksiyonu (HER) sırasıyla anotta ve katotta gerçekleşir. O₂ atmosfere geri salınırken, H₂ daha sonra HYH'lerde yakıt olarak kullanılır (Yu vd., 2021). Su elektrolizinin temel reaksiyonu, Eş. 1.'de (Pandiyan vd., 2019) verilmiştir:



Termodinamik hücrenin teorik voltajı oda sıcaklığında 1,23 V iken, verimli bölme için deneysel voltaj 1,3-1,48 V aralığındadır. Ekstra enerji, ohmik direnci ve malzemenin neden olduğu reaksiyon kinetiğindeki dalgalanmaları aşmak için sağlanır (Rezk vd., 2023). Elektrolizörler ve YH'ler, elektrolit türleri ve elektrokimyasal reaksiyonlar bakımından benzerlik gösterirler, ancak

reaksiyonları ve uygulamaları bakımından farklılık gösterirler; elektrolizörler GHP'ye, YH'ler ise güç üretimine odaklanır (Wang vd., 2022). Aslında bir elektrolizör, elektronları H_2 formunda depolayarak elektrik enerjisini kimyasal enerjiye dönüştürür ve bu H_2 , YH'lerde yakıt olarak kullanılır veya tekrar elektriğe dönüştürülür. Bu nedenle GHP teknolojisi, kararlı bir şebeke oluşturmak için YH sistemlerine tamamlayıcı bir unsur olarak kabul edilir (Bodkhe vd., 2023). Öte yandan, suyu H_2 ve O_2 'ye ayırmak kendiliğinden gerçekleşmeyen ve endotermik bir reaksiyondur (Zhang vd., 2018); bu nedenle bu GHP'nin, gelişmiş fosil bazlı yaklaşımlarla enerji açısından rekabetçi olması gerekir. Güneş paneli, rüzgar santrali ve jeotermal santral gibi yenilenebilir enerji santralleriyle birleştirilmiş elektroliz yoluyla GHP, muhtemelen yüksek saflıkta en çevre dostu GHP teknolojisidir (Pushkareva vd., 2020). Elektrolizörün YH'lerle sinerjik kombinasyonu, elektrik tedariki için şematik olarak Şekil 1'de sunulmuştur. Burada, doğa enerjilerinden başlayarak nihai kullanıma ve şebekeye kadar uzanan bir endüstriyel zincir önerilmektedir. Günümüzde, PV-elektrolizi, GHP için söz konusu kombinasyonun yaygın endüstriyel kullanımıdır (Dincer, 2012).



Şekil 1. Elektrolizörlerin yakıt hücreleriyle sinerjik kombinasyonunun şematik gösterimi (Dincer, 2012)

2.1.1. Alkali elektrolizör

Alkali elektrolizör (AE), endüstrideki en gelişmiş elektroliz prosesidir. AE'lerdeki elektrolitler, en iletken alkali hidroksit olan potasyum hidroksit (KOH) konsantre çözeltisidir. AE'lerdeki ticari KOH konsantrasyonu %30'dur ve bu da geri kazanılabilirlik ve yeniden kullanılabilirlik sağlar. Su, başlangıçta H ve OH iyonlarına ayrışır, ardından protonlar (H^+) H_2 'ye indirgenir ve katot yüzeyinde ürün elimine edilir. Anyon (OH^-), yarı geçirgen ayırıcı aracılığıyla anoda OH^- olarak taşınır ve oksitlenerek O_2 üretir (Pandiarajan vd., 2015). Nikel

ve metal oksitlerle kaplanmış nikel, AE'lerde sırasıyla katot ve anot için yaygın malzemelerdir. Ayırıcı genellikle asbest, Zirfon, nikel kaplı delikli paslanmaz çelikten yapılır (Manjula vd., 2020). Teknolojik olgunluk, düşük maliyet, çok ölçekli seçeneklerin bulunması ve uzun vadeli dayanıklılık, AE'lerin bazı avantajlarıdır. AE'lerin yaygın kullanımının önündeki başlıca engeller, hücrenin ömrünü etkileyen aşındırıcı elektrolit, akım yoğunluğu ($0,1-0,5 \text{ A/cm}^2$) açısından düşük performans ve H_2 saflığıdır. KOH'un ortam CO_2 'sine karşı yüksek hassasiyeti, elektrot ve ayırıcı üzerindeki gözenekleri kapatan ve iyonik iletkenlik (IC) ve akım yoğunluğunda bir azalmaya neden olan K_2CO_3 oluşumuna neden olur (Kim vd., 2023). Bu, daha ince ayırıcılar ve yüksek özgül yüzey alanlı elektrot malzemeleri kullanılarak çözülebilir (Choi vd., 2021). H_2 'nin düşük saflığı, ürün gazlarının geçişinden kaynaklanır. Gazların birbirine karışması, proses parametrelerinin kontrol edilmesiyle önlenmiştir. Artan sıcaklık, azalan akış hızı ve dinamik döngü stratejisi, H_2 safsızlığını azaltır (Haug vd., 2017).

2.1.2. Katı Polimer Elektrolit

Son yıllarda AE'lerde gözlenen düşük akım yoğunluğu, güvenlik sınırlamaları ve kısmi yük sorunlarının üstesinden gelmek için katı polimer elektrolitler (SPE) içeren elektroliz teknolojileri geliştirilmiştir. SPE'ler, gazlara karşı daha düşük geçirgenliğe, makul boyutlara ve kalınlıklara sahiptir. Bir SPE matrisinin kristallik derecesi, iyon hareketliliğini ve taşıma hızını etkiler. SPE tipi seçimi, IC, mekanik kararlılık ve işlenebilirlik gibi uygulamanın özel gereksinimlerine bağlıdır. SPE hücreleri, bir membran elektrot düzeneği (MEA), gaz difüzyon tabakası (GDL), ayırıcı plakalar (bipolar plakalar) ve uç plakalardan oluşur. Katot ve anot katalizör katmanları (CL'ler) ile istiflenmiş polimerik membran, 3 katmanlı MEA'yı oluşturur. Bununla birlikte, GDL'ler ve bipolar plakalar bazen MEA'ların içine yerleştirilerek sırasıyla 5 katmanlı ve 7 katmanlı MEA'lar oluşturulur. Bir MEA, protonların iletiminden, elektrotların elektriksel yalıtımından, üretilen gazların ayrılmasından ve reaksiyonun katalizlenmesinden sorumludur. Günümüzde, aktardıkları seçici iyonla bağlı olarak proton değişim membranı (PEM) ve anyon değişim membranı (AEM) olmak üzere iki tür SPE bulunmaktadır ve bu membranların temel belirleyici faktörleri burada ele alınmaktadır.

2.1.3. a Proton Değişim Membranlı Elektrolizör

SPE'lerin ilk alt grubu, PEM membranının özellikle O_2 ve H_2 gazlarına karşı elektronik bir yalıtkan ve reaktan bariyeri görevi görürken protonları iletmek üzere tasarlandığı PEM elektrolizörleridir. Genellikle PEM elektrolizi, yüksek akım yoğunluklarında ($1-2 \text{ A/cm}^2$) $30-80 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında çalışarak yüksek

saflıkta (%99,999) gazlar (H_2 ve O_2) üretir (Trinke vd., 2018). PEM elektrolizinde HER kinetiği, elektrotların metal yüzeyinin oldukça aktif alanı ve elektrolitin düşük pH değeri nedeniyle hızlıdır. Bu işlem sırasında su, anotta O_2 'ye oksitlenir ve ayrılır. Elde edilen H^+ , anottan harici güç kaynağı devresi aracılığıyla hareket ettirilen elektronların yardımıyla H_2 üretimini takiben katot yönünde PEM boyunca hareket eder. PEM'ler genellikle gaz geçişini ve elektronların kısa devre yapmasını en aza indiren perflorosülfonik asit (PFSA) gibi malzemelerden yapılır (Trinke vd., 2018).

Elektrik birimi başına hidrojen üretmede yaklaşık %80'lik verimlilik, PEM elektrolizörlerinin bir avantajıdır. Bu teknik düşük bir sıcaklıkta çalışsa da, protonların membrandan hızlı geçişine izin verir ve daha hızlı dinamik tepki ve daha kapsamlı çalışma gücü aralıkları sağlar. PEM teknolojisi, kostik elektrolitlerin olmaması ve daha küçük karbon ayak izi nedeniyle güvenli bir elektroliz teknolojisidir (Gu vd., 2023). PEM'lerde güç yoğunluğu, gaz saflığı ve çıkış basıncı yüksek seviyededir ve çok esnek ve kısmi yükte çalışma olanağı sunar (Kumar ve Himabindu, 2019). Bu faydalı özelliklere rağmen, PEM elektrolizörleri daha kısa yığın ömrü ve bireysel bileşenler ve üretim maliyetleri açısından pahalılık gibi sorunlarla karşı karşıyadır. Bu nedenle, mevcut malzeme miktarının değiştirilmesi veya azaltılması gerekli görünmektedir. Bu engeller, soy olmayan katalizörler içeren dayanıklı ve verimli elektrotların tasarlanması ve üretilmesi, mekanik olarak güçlü membranların kalınlığının azaltılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının dahil edilmesiyle hafifletilebilir (Tawalbeh vd., 2024).

2.1.4. b Anyon Değişim Membranı

SPE'lerin diğer grubu, membranın katottan anoda yalnızca OH^- anyonlarını ilettiği AEM elektrolizörleridir. PEM elektrolizörlerine benzer şekilde, bir MEA tasarlanarak optimize edilir. Bu tür elektroliz, PEM'den daha yeni bir teknolojidir ve iyi geliştirme potansiyeline sahiptir, ancak henüz yerleşik bir pazara sahip değildir (Pati vd., 2011). Bu elektrolizör, düşük elektrolit konsantrasyonlarında ve 20-60 °C sıcaklık aralığında çalışır. Elektrolitik işlem farklı adımlarda gerçekleşir: önce su, anot yarı hücresinden membran boyunca hareket eder ve ardından hidrojen katotta üretilir ve GDL aracılığıyla salınır. OH^- , membran aracılığıyla anoda geri döner ve ardından O_2 oluşur. O_2 , anotta üretilir ve GDL aracılığıyla dışarıya salınır. Tipik AEM'ler, Fumasep, Fumatech ve Sustanion gibi kuaterner amonyum iyon değişim membranlarıdır. NiFe oksihidratlar, Ni/CeO₂-La₂O₃, CuCoO_x, NiFe ve NiFe₂O₄ anot malzemelerinde sıklıkla kullanılırken, Ni, NiMo, Pt/X, IrO_x/IrO₂ ve NiP katot malzemeleri olarak yaygın olarak kullanılır. Karbon kumaş ve nikel köpük/gözenekli nikel ağ, katot ve anot

GDL için yaygındır. Geleneksel uç ve bipolar plakalar sırasıyla nikel kaplı paslanmaz çelik ve paslanmaz çelik uç plakalardır (Ayers vd., 2013).

Bu teknoloji, daha düşük ohmik kayıp, çökme olmaması, düşük konsantrasyonlu elektrolit kullanımı ve daha ucuz hammaddeler gibi bazı avantajlar sağlar. Düşük sıcaklıkta çalıştığı için gerekli enerji maliyeti sınırlıdır. Yüksek IC seviyeleri, önemli akım yoğunluklarına ve verimliliğe ulaşılmasını sağlar (Vincent vd., 2018). Bu avantajlara rağmen, membran dayanıklılığı kimyasal doymazlık ve polimerin omurga zincirinin bozulması nedeniyle yaklaşık 30.000 saat sınırlıdır. Bu nedenle, polimer bozulmasını kontrol altına almak ve AEM'nin ömrünü uzatmak için önemli iyileştirmeler gerekmektedir. Bu, membranların termal, mekanik ve kimyasal kararlılıklarının artırılması ve yüksek iletkenliğe sahip katyonik polimer bileşimleriyle iyon değişim kapasitesinin artırılmasıyla sağlanabilir (Santoro vd., 2022).

2.1.5. Katı Oksit Elektrolizörü

SOE, yüksek verimlilikle GH üreten ve yaklaşık 1,3 V elektrik potansiyeline sahip bir elektrokimyasal hücrede CO₂'yi eş-elektroliz eden su elektroliz tekniklerinden biridir (Mehmeti vd., 2018). SOE, yüksek sıcaklıklarda (500-850 °C) aşırı ısıtılmış buharla çalışır, suyu O₂ ve H₂'ye ayırmak için gereken güç tüketimini önemli ölçüde azaltır ve dolayısıyla hücre performansını iyileştirir. SOE'ler, proton iletken ve oksijen iyonu (anyon) olmak üzere iki türdür. Proton iletken bazlı SOE'lerde, anotta su elektrolizinden üretilen protonlar, elektrolitten katoda doğru nüfuz eder ve burada elektronlarla reaksiyona girerek hidrojen üretir (Mehmeti vd., 2018). Oksijen iyon iletken SOE'lerde ise süreç, katoda buhar verilmesi ve gerekli potansiyelin uygulanmasıyla başlatılır. H₂ katotta oluşurken, O₂ iyonları H₂'den katı elektrolit aracılığıyla O₂ elektroduna göç eder, O₂'ye oksitlenir ve anotta salınır (Pati vd., 2009).

Yakıt esnekliği, uzun vadeli kararlılık ve verimli hidrojen üretimi, SOE elektrolizörlerinin üstünlüklerinden bazılarıdır. Ancak, yüksek çalışma sıcaklığı, yavaş başlatma ve devreye girme süreleri ve düşük gaz saflığı, uygulamalarını kısıtlamaktadır (Xu vd., 2024). Yeni malzemeler geliştirmek, modüler tasarım ve anot-katot konfigürasyonunun optimum olması bu sorunları ele almakta ve SOE elektrolizörünü temiz enerji alanında uygun bir aday haline getirmektedir.

2.2. Fotoelektrokimyasal Ayrışma

Su, ışıqla enerjilendirilen bir elektrokimyasal hücrede hidrojen ve oksijene ayırır. Bu yöntemde, TiO₂ ve CeO₂ gibi düşük bant aralıklı yarı iletken malzemeler, genellikle alkali bir çözelti olan su bazlı bir elektrolite daldırılmış

fotoelektrot veya fotokatalizör görevi görür. Karşıt elektrot genellikle bir platin ağıdır, referans elektrot ise genellikle Hg/HgO 'dur ve bu da fotoelektrokimyasal reaksiyonlar sırasında verimli elektron transferini ve kararlılığı kolaylaştırır (de Risi vd., 2023). TiO_2 ve CeO_2 gibi düşük bant aralıklı yarı iletken malzemeler, birkaç temel özelliği nedeniyle özellikle fotoelektrot olarak kullanıma uygundur. Anataz fazında yaklaşık 3,2 eV bant aralığına sahip TiO_2 , kararlı, bol miktarda bulunur ve çevre dostudur (Hussain vd., 2023). Ancak, geniş bant aralığı, emilimi esas olarak güneş spektrumunun yalnızca küçük bir bölümünü oluşturan ultraviyole aralığıyla sınırlar. Verimliliğini artırmak için, kobalt gibi diğer malzemelerle katkılama yapılarak emilimi görünür bölgeye kaydırılıp iletkenliği artırılmıştır. Benzer şekilde, CeO_2 daha düşük bir bant aralığına ve dikkate değer bir kimyasal kararlılığa sahiptir ve bu da onu güneş ışığını emmede ve fotoelektrokimyasal uygulamalar için elektron-delik çiftleri oluşturmada verimli kılar (Tripathi vd., 2024). Her iki malzeme de sürdürülebilir hidrojen üretimi için hayati önem taşıyan korozyon direnci ve uzun vadeli kararlılıktan faydalanır.

Bu tip hücreler, yerinde GHP olanağı ve tek bir hücrede yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre olma imkânı ile düşük sıcaklıklarda çalışır. Fotoelektrodun arayüz kararlılığı (elektrot/elektrolit), malzeme bütünlüğü ve koruyucu kaplama ile bant aralığı tarafından indüklenen katalizör kinetiği açısından kararlılığının hücrenin kararlılığını etkilediğini belirtmekte fayda var. Öte yandan, safsızlıklara karşı hassasiyet (örneğin, katkı maddesi, hammadde, yük tuzağı ve geçiş metali safsızlıklarının optimize edilmemiş konsantrasyonu) ve geniş bir yüzey alanına duyulan ihtiyaç, bunların daha fazla geliştirilmesini ve endüstriyelendirilmesini engellemektedir (Luo vd., 2021). Mikro/nanoyapılar kullanılarak geometri mühendisliği, örneğin p-Si fotoelektrotlarda özgül yüzey alanını artırmak için yaygın bir stratejidir (Kawde vd., 2018). Düzenli düzlemsel yapıları, geniş özgül yüzey alanları, mükemmel hidrofiliklikleri, metalik iletkenlikleri ve çok çeşitli işlevsellikleri ve yüzey sonlandırma grupları olan MXene'ler, su ayrıştırma için de araştırılmıştır (Almomani vd., 2023). Fotoelektrot üzerindeki safsızlık dağılımının manipüle edilmesinin, su ayrıştırmada hücre verimliliğini artırdığı bildirilmiştir (Kronawitter vd., 2012). Fotoelektrokimyasal ayrıştırma teknikleri, daha önce açıklanan elektrolizörlerde uygulanabilir.

2.3. Fotobiyolojik Bölünme/Doğrudan Biyofotoliz

Bazı mikroorganizmalar, biyofotosentez adı verilen bir süreç sırasında ışık ve CO_2 varlığında suyu H_2 ve O_2 'ye dönüştürme yeteneğine sahiptir. Bitkilerdeki fotosenteze benzer bu süreç, doğrudan ve dolaylı olarak tanımlanır. Doğrudan biyofotosentezde, GHP'de yer alan iki fotosistem II ve I (PSII ve PSI) bulunur (Rosero-Chasov vd., 2023). PSI ve PSII, klorofil ve karotenoid pigmentleri içeren

ışık toplayan anten yapıları içeren büyük protein kompleksleridir; ancak bileşimleri farklıdır. PSII, PSI'da bulunmayan, su oksidasyonundan sorumlu bir manganez kümesine sahiptir. Yeşil alg (*Chlamydo monas reinhardtii*) ve siyanobakteri (*Synechocystis*) gibi mikroorganizmalar bu fotosistemlere sahiptir (Ferraren-De Cagalitan ve Abundo, 2021). Bu süreç, mikroorganizmanın kloroplast zarının içinde elektron transferi yoluyla gerçekleşir. Başka bir deyişle, PSI CO₂ indirgenmesi için enerji sağlar ve PSII, su ayırma ve O₂ üretimi rolüne sahiptir (Ourya ve Abderafi, 2022). PSII, giriş ışığını emer ve suyu H⁺, O₂ ve bir elektrona ayırır. Ardından, elektronların PSII'den PSI'ye aktarıldığı bir elektron transfer zinciri vardır. Buradaki biyoreaktörler atık su ile beslenme potansiyeline sahiptir (Ferraren-De Cagalitan ve Abundo, 2021), bu da onu GHP ile eş zamanlı atık su arıtımı için güvenilir bir entegrasyon teknolojisi haline getirir. Ayrıca yenilenebilir güneş enerjisinden yararlanır ve süreci, ekipmanla birlikte büyük ölçekli üretim için çok yönlüdür. Bu avantajlarına ve sıfır CO₂ emisyonu için yenilenebilir ve çevre dostu bir yöntem olmasına rağmen, düşük kinetik, enzim aktivitesi ve indirgeyici kısıtlamalarından kaynaklanan zorluklar ve verimsizliklerle karşı karşıyadır ve bu da ticari uygulanabilirliğini geciktirmektedir.

2.4. Termokimyasal Ayırıştırma

Termokimyasal ayırıştırma, suyun H₂ ve O₂'ye dönüşümünün enerji kaynağı ısıdır (500-2000 °C). Bu yaklaşımın birkaç türü vardır: a) 2000 °C'den daha yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyan iki adımlı yüksek sıcaklık çevrimleri, b) düşük sıcaklıklarda (500-600 °C) düşük sıcaklıklı çok adımlı çevrimler ve c) yaklaşık 1000 °C'de gerekli ısıyı sağlamak için güneş enerjisinden yararlanan güneş destekli çevrimler. Kesin sıcaklıklar uygulamaya ve proses koşullarına bağlıdır (Mehrpooya ve Habibi, 2020). (a) tipinde, yüksek bir enerji kaynağına, iki çevrimin verim dengesizliğine (Gao vd., 2020) ve seryum oksit gibi metal oksitlerin gaz-katı redoks reaksiyonları için egzotik ve pahalı termal olarak kararlı reaktör malzemelerine ihtiyaç vardır (Bhosale, 2023). Tip (b) sıcaklık aralığında, aşındırıcı ve toksik kimyasallar, örneğin hibrit bakır klorür döngüleri, genellikle su moleküllerini parçalayabilir ve bu da güvenli ortam uygulamasında zorluklara neden olur. Tip (c)'deki, bölme reaksiyonunda düşük oksijen basıncını tolere edebilecek şekilde tasarlanmış bir yapıya sahip perovskit malzemelere ihtiyaç vardır (Zhang vd., 2023). İki döngülü yöntemde redoks aktivitesini ve hidrojen üretim verimliliğini artırmak için seryum oksitlerin çinko ve nikel iyonlarıyla modifikasyonu incelenmiştir (Liu vd., 2024). Mikrodalgalardan yararlanmak, termokimyasal bölme için gereken enerjiyi sağlamak için başka bir stratejidir (Gao vd., 2020). Kompozisyonel olarak karmaşık yeni bir perovskit

oksit sınıfının tanıtılmasının, istenen termodinamik ve kinetik özellikleri ve faz kararlılığını aynı anda elde ettiği bildirilmiştir (Zhang vd., 2023). Elektriğe bağımlı olmaması ve kimyasalların yeniden kullanılma olasılığı, bu tekniğin avantajlarıdır.

2.5. Biyokütle Piroliz

Piroliz genellikle biyoyakıt üretimi için kullanılır, ancak biyokütlenin O₂ yokluğunda doğrudan termal ayrışması (500-600 °C) GHP yöntemlerinden biridir. Fıstık kabuğu, plastik atıklar, tuzak yağı, sentetik polimerler, kolza tohumu, tarımsal atık ve karışık biyokütle gibi çeşitli biyokütleler biyohidrojen üretmek için kullanılmıştır (Hosseini ve Wahid, 2016). Yeterli bekleme süresi, kontrollü ısıtma hızı ve Ni gibi katalizör türü H₂ üretimine katkıda bulunur; şiddetli piroliz türünde, CO₂ üretimi neredeyse sıfıra iner ve biyokömür, hidrojenin yanı sıra bir biyoüründür (Rosero-Chasov vd., 2023). Ayrıca, GHP verimliliğini artırmak için su-gaz dönüşüm reaksiyonu yapılır. Yüksek çalışma sıcaklığı, biyokütlenin karmaşık bileşimi, düşük sıcaklıklarda olası hidrokarbon üretimi ve NO_x ve SO_x emisyonu, biyokütle pirolizinin sorunlarından bazılarıdır. Nispeten yüksek verimlilik, düşük üretim maliyeti ve atık ısının geri kazanılma olasılığı, pirolizin bazı avantajlarıdır. Ayrıca, fosil yakıtlardan yenilenebilir ve sürdürülebilir bir H₂ ekonomisine geçişte bir köprü teknolojisi gibi görünmektedir.

3. Yeşil Membranlar

Bir YH yığını, istenen uygulama için yeterli elektrik üretmek üzere birden fazla YH'yi seri olarak birleştiren bir güç sistemidir (Sazali vd., 2020). YH'lerin enerjisini doğru bir şekilde yönetmek için teknik ve ekonomik yönlerin incelenmesi kaçınılmaz görünmektedir. Bu bağlamda, örneğin Al-Othman ve ark., yapay zekayı göz önünde bulundurarak teknik, ekonomik, çevresel ve sosyopolitik faktörlerin bir optimizasyonunu sunmuştur. Teknik yönler, bir teknolojinin olgunlaşması için daha fazla deney ve deneme-yanılma gerektirir. Hem yığın hem de tek hücreli YH'ler, MEA'ların belirleyici bileşenlerden biri olduğu elektrolizörlere benzer. Verimlilik ve nihai maliyet, YH yığınlarının teknik güvenilirliğini, ticarileşmesini ve çeşitli kullanım alanlarını belirler. Yakıt türünden bağımsız olarak, MEA'ların seçici seçimi, rasyonel tasarımı ve entegrasyonu, YH'lerin nihai verimliliğini önemli ölçüde etkiler. Elektrolizörlere benzer şekilde, MEA, anot GDL, anot CL, elektrolit membran, katot CL ve katot GDL'yi içeren YH'nin temel parçasıdır (Gouda vd., 2020). MEA, genellikle PEM YH'lerinde kullanılır; ancak yalnızca bu tip YH'lere özgü değildir ve diğer YH'lerde de uygulanabilir.

3.1. Yeşil Malzemelerle Modifiye Edilmiş Mevcut Ticari Elektrolitler

Nafion gibi mevcut elektrolitlere alternatif olarak ilk yaklaşım, bunları diğer yeşil ve potansiyel malzemelerle (GPM'ler) modifiye etmektir. Nafion için mevcut yeşil modifikasyon teknikleri, başka bir polimerik faz ile birleştirme, ekstra kimyasal katkılama, çapraz bağlama ve inorganik kompozit oluşumunu içerir. Sülfonlu veya sülfonsuz formdaki diğer polimerik fazlar, gaz bariyeri özelliklerini ve ürün geçişini iyileştirmek (Cai vd., 2016), su alımını düzenlemek (Tiwari ve Ghangrekar, 2018) ve maliyeti yönetmek (Cha vd., 2023) amacıyla öncelikle Nafion içinde birleştirilmiştir. Nafion varlığında ikinci polimerik fazlar arasında Politetrafloroetilen (PTFE), poli(aril keton) benzeri polietereterketon (PEEK), polistiren, poliakrilonitril, polifenilen oksit, poli akrilik asit, polipirol, polianilin, poli(3,4 etilendioksitiyofen) (PEDOT), poli(N-vinil imidazol), poliviniliden florür (PVDF), polivinilpirolidon (PVP), polietilen, poli benzimidazol ve poli(eter (amino sülfon)) gibi çeşitlilikler olmuştur. Bununla birlikte, lignin (Elham vd., 2024), poli vinil alkol (PVA), selüloz, polidopamin (Mayadevi vd., 2022), poli vinil asetat ve kitosan (Bagherzadeh vd., 2023) şimdiye kadar Nafion ile birleştirilmiş GPM'ler olarak kabul edilmiştir. Literatürde, bu polimerlerin varlığında gaz geçirgenliğinde bir azalma ve sülfonatlı türevlerle iyonik iletkenliklerde bir artış gözlemlenmiştir (Cai vd., 2016). Örneğin, Nafion ve kitosan karışımlarının membran olarak üretilmesi ve bunların etkileşimi, metanol direkt metanol FC'lerinde geçirgenlik kontrolü için bir koşul sağlamıştır. Çevre dostu bir membran olan Nafion-lignosülfonatın da ürünün geçirgenliğini ve çapraz geçişini azalttığı bildirilmiştir. En iyi seçicilik, 0,92 S/cm proton iletkenliğine ve 11,7 mW/cm² güç yoğunluğuna sahip %10 ağırlıkça lignin içeren kompozitte gözlemlenmiştir (Elham vd., 2024).

3.2. Ticari elektrolitlerin kompozit olmayan ve kompozit yeşil bileşenleri

PTFE, PEEK ve aromatik sıvı iyonik (Mohammed vd., 2021) gibi Nafion'a alternatifler GPM olarak tanımlanmamıştır. Yenilenebilir kaynaklardan elde edilen uygun maliyetli ve çevre dostu polimerler, SPE YH'lerde kullanılan sentetik polimerlere umut verici bir alternatif gibi görünmektedir (Palanisamy vd., 2023). Biyolojik olarak parçalanabilirlikleri, Nafion'un çevre dostu olmayan doğasına bir çözümdür ve film veya elyaf formunda kullanılabilirler. Bununla birlikte, kimyasal kararlılıkları, iletkenlikleri ve bozunmalarının, muhtemelen ikincil polimerlerin veya inorganik mikro/nano yapıların varlığıyla gerçekleştirilebilecek şekilde tasarlanması gerekmektedir. Bu polimerler, sülfosüksinik asit (SSA) (Adam vd., 2022) ve glutaraldehit (GA) (Punniakotti vd., 2021) veya ısı uyarıcıları (Awad vd., 2022) gibi çapraz bağlayıcı maddelerle fiziksel veya kimyasal olarak çapraz bağlanmalıdır; böylece yapısal kararlılıkları korunur ve su emilimi ve iyon hareketlilikleri ayarlanır. Düşük iyonik ve

elektrikseletkenlikleri, polimerin ana zincirinin kimyasal modifikasyonu (Atkar vd., 2024) veya kimyasal katkı maddeleriyle karıştırıldıktan sonra iyonik etkileşimler yoluyla da manipüle edilir. Fiziksel veya kimyasal modifikasyonları, fonksiyonel grupların varlığıyla ilişkilidir. YH'lerde, katkı maddesinin ve çapraz bağlayıcının türüne ve ilgili kısmına bağlı olarak bir PEM veya bir AEM olarak hareket edebilirler.

4. Yeşil Elektrotlar

Elektrokimyasal özellikler açısından MEA ve elektrot bileşenleri arasında bir uyumsuzluğun önlenmesi için elektrotların doğru tasarımı esastır (Ferriday ve Middleton, 2021). Bununla birlikte, geri dönüştürülebilir malzemelerden elde edilen düşük maliyetli malzemelerin ve değersiz katalizörlerin (Adam vd., 2022) kullanılması, YH'lerdeki elektrotlarla ilgili literatürde ana etkindir. Bu bölümde, MEA'ların elektrot kısmında en az bir bileşen olarak incelenen GPM'ler incelenmektedir. MEA'ların üç katmanlı (anot, elektrolit ve katot) ve yedi katmanlı (bipolar plakalar, GDL'ler, anot ve katot katalizör katmanları ve membran) olarak tasarlandığını belirtmekte fayda bulunmaktadır. MEA'lardaki elektrot kısmı, CL'ler, GDL'ler ve hem katot hem de anot bipolar plakaları olarak adlandırılır. Elektrolitler üzerindeki katalizör tabakasının varlığının YH'lerin yorulma davranışını ve kullanım ömrünü etkilediği bilinmektedir. Parçacık boyutu ve dağılımı, katalizörün morfolojisi ve bütünlüğü, destek bütünlüğü ve membran üzerindeki katalizör kaplamasının kalitesi, kullanım ömrü değişiminin bazı temel faktörleridir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, çeşitli yeşil hidrojen üretim yöntemleri sınıflandırılmış ve karşılaştırılmıştır. Su kullanımında elektroliz teknolojisi, ayak izinde termokimyasal biyo yaklaşımlar ve SOE elektrolizörlerinin verimliliği diğerlerinden daha yüksek seviyelerdedir. Uygulama açısından, PEM ve SOE YH'ler yalnızca geniş bir hammadde yelpazesi için değil, aynı zamanda taşınabilir elektronik cihazlardan ticari binalara kadar çeşitli uygulamalar için de uygun adaylar olabilir. Selüloz ve PVA gibi biyopolimerler, elektrolit olarak en çok bildirilen yeşil malzemeler olurken, karbon bazlı bileşenler elektrot olarak yaygın malzemelerdir. GPM'ler ister polimerlerden, organik ve inorganik yapılardan oluşan doğa kaynaklı malzemeler, ister sürdürülebilir, çevre dostu sentetik malzemeler olsun, GPM'nin çok bileşenli membranları, tek başına GPM'nin eksikliklerini giderir ve mevcut ticari membranlarla karşılaştırılabilir akım ve güç yoğunlukları ve IC sunmaya eğilimlidir. Nafion gibi malzemelerin laboratuvar ölçeğinde uygulanabilir bir GPM iyonuyla değiştirilmesi çok olasıdır.

Kaynaklar

- Adam, M. R., Hassan, A. A. M., Othman, M. H. D., Puteh, M. H., Ismail, A. F., Rahman, M. A., & Jaafar, J. (2022). Fabrication and characterization of hybrid poly (vinyl alcohol) based proton exchange membrane for energy generation from wastewater in microbial fuel cell system. *International Journal of Energy Research*, 46(15), 23418-23432.
- Al-Othman, A., Nancarrow, P., Tawalbeh, M., Ka'ki, A., El-Ahwal, K., El Taher, B., & Alkasrawi, M. (2021). Novel composite membrane based on zirconium phosphate-ionic liquids for high temperature PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(8), 6100-6109.
- Al-Othman, A., Tawalbeh, M., Martis, R., Dhou, S., Orhan, M., Qasim, M., & Olabi, A. G. (2022). Artificial intelligence and numerical models in hybrid renewable energy systems with fuel cells: Advances and prospects. *Energy Conversion and Management*, 253, 115154.
- Almomani, F., Al-Rababah, A., Tawalbeh, M., & Al-Othman, A. (2023). A comprehensive review of hydrogen generation by water splitting using 2D nanomaterials: Photo vs electro-catalysis. *Fuel*, 332, 125905.
- Atkar, A., Sridhar, S., Deshmukh, S., Dinker, A., Kishor, K., & Bajad, G. (2024). Synthesis and characterization of sulfonated chitosan (SCS)/sulfonated polyvinyl alcohol (SPVA) blend membrane for microbial fuel cell application. *Materials Science and Engineering: B*, 299, 116942.
- Awad, S., Abdel-Hady, E. E., Mohamed, H. F., Elsharkawy, Y. S., & Gomaa, M. M. (2022). Evaluation of transport mechanism and nanostructure of nonperfluorinated PVA/sPTA proton exchange membrane for fuel cell application. *Polymers for Advanced Technologies*, 33(10), 3339-3349.
- Ayers, K. E., Anderson, E. B., Capuano, C. B., Niedzwiecki, M., Hickner, M. A., Wang, C. Y., ... & Zhao, W. (2013). Characterization of anion exchange membrane technology for low cost electrolysis. *ECS Transactions*, 45(23), 121.
- Bagherzadeh, A., Tohidian, M., Sadafi, Y. M., Shamsabadi, A., & Makki, H. (2023). Polyelectrolyte membranes based on Nafion/chitosan blends for direct methanol fuel cell application. *Journal of the Electrochemical Society*, 170(8), 084504.
- Bhosale, R. R. (2023). Recent developments in ceria-driven solar thermochemical water and carbon dioxide splitting redox cycle. *Energies*, 16(16), 5949.
- Bodkhe, R. G., Shrivastava, R. L., Soni, V. K., & Chadge, R. B. (2023). A review of renewable hydrogen generation and proton exchange membrane fuel cell

- technology for sustainable energy development. *International Journal of Electrochemical Science*, 18(5), 100108.
- Cai, W., Fan, K., Li, J., Ma, L., Xu, G., Xu, S., ... & Cheng, H. (2016). A bi-functional polymeric nano-sieve Nafion composite membrane: Improved performance for direct methanol fuel cell applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(38), 17102-17111.
- Cha, J. E., Jang, S., Seo, D. J., Hwang, J., Seo, M. H., Choi, Y. W., & Kim, W. B. (2023). A reinforced composite membrane of two-layered asymmetric structure with Nafion ionomer and polyethylene substrate for improving proton exchange membrane fuel cell performance. *Chemical Engineering Journal*, 454, 140091.
- Choi, B. B., Jo, J. H., Lee, T., Jeon, S. Y., Kim, J., & Yoo, Y. S. (2021). Operational characteristics of high-performance kw class alkaline electrolyzer stack for green hydrogen production. *J. Electrochem. Sci. Technol*, 12(3), 302-307.
- de Risi, A., Colangelo, G., & Milanese, M. (2023). Advanced technologies for green hydrogen production. *Energies*, 16(6), 2882.
- Dincer, I. (2012). Green methods for hydrogen production. *International journal of hydrogen energy*, 37(2), 1954-1971.
- Elham, O. S. J., Kamarudin, S. K., Shaari, N., Zainoodin, A. M., Zakaria, Z., & Yusof, M. R. (2024). Development of low-cost nafion-lignin composite conductive membranes for application in direct methanol fuel cells. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(1), 111514.
- Fan, L., Tu, Z., & Chan, S. H. (2021). Recent development of hydrogen and fuel cell technologies: A review. *Energy Reports*, 7, 8421-8446.
- Ferraren-De Cagalitan, D. D. T., & Abundo, M. L. S. (2021). A review of biohydrogen production technology for application towards hydrogen fuel cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111413.
- Ferriday, T. B., & Middleton, P. H. (2021). Alkaline fuel cell technology-A review. *International journal of hydrogen energy*, 46(35), 18489-18510.
- Gao, Y., Mao, Y., Song, Z., Zhao, X., Sun, J., Wang, W., ... & Chen, S. (2020). Efficient generation of hydrogen by two-step thermochemical cycles: Successive thermal reduction and water splitting reactions using equal-power microwave irradiation and a high entropy material. *Applied Energy*, 279, 115777.
- Gouda, M. H., Elnouby, M., Aziz, A. N., Youssef, M. E., Santos, D. M. F., & Ellessawy, N. A. (2020). Green and low-cost membrane electrode assembly for proton exchange membrane fuel cells: Effect of double-layer electrodes and gas diffusion layer. *Frontiers in Materials*, 6, 337.

- Gu, X., Ying, Z., Zheng, X., Dou, B., & Cui, G. (2023). Photovoltaic-based energy system coupled with energy storage for all-day stable PEM electrolytic hydrogen production. *Renewable Energy*, 209, 53-62.
- Haug, P., Koj, M., & Turek, T. (2017). Influence of process conditions on gas purity in alkaline water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(15), 9406-9418.
- Hosseini, S. E., & Wahid, M. A. (2016). Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 850-866.
- Hussain, A., Rauf, A., Ahmed, E., Khan, M. S., Mian, S. A., & Jang, J. (2023). Modulating optoelectronic and elastic properties of anatase TiO₂ for photoelectrochemical water splitting. *Molecules*, 28(7), 3252.
- Javed, R. M. N., Al-Othman, A., Tawalbeh, M., & Olabi, A. G. (2022). Recent developments in graphene and graphene oxide materials for polymer electrolyte membrane fuel cells applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 168, 112836.
- Kawde, A., Annamalai, A., Amidani, L., Boniolo, M., Kwong, W. L., Sellstedt, A., ... & Messinger, J. (2018). Photo-electrochemical hydrogen production from neutral phosphate buffer and seawater using micro-structured p-Si photo-electrodes functionalized by solution-based methods. *Sustainable Energy & Fuels*, 2(10), 2215-2223.
- Kim, H., Choe, C., Lee, A., & Lim, H. (2023). Application of green hydrogen with theoretical and empirical approaches of alkaline water electrolysis: life cycle-based techno economic and environmental assessments of renewable urea synthesis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(43), 16148-16158.
- Kronawitter, C. X., Ma, Z., Liu, D., Mao, S. S., & Antoun, B. R. (2012). Engineering impurity distributions in photoelectrodes for solar water oxidation. *Advanced Energy Materials*, 2(1), 52-57.
- Kumar, S. S., & Himabindu, V. (2019). Hydrogen production by PEM water electrolysis—A review. *Materials Science for Energy Technologies*, 2(3), 442-454.
- Kumar, S. S., & Lim, H. (2022). An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. *Energy reports*, 8, 13793-13813.
- Lin, R. H., Xi, X. N., Wang, P. N., Wu, B. D., & Tian, S. M. (2019). Review on hydrogen fuel cell condition monitoring and prediction methods. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(11), 5488-5498.
- Liu, Y., Gu, T., Bu, C., Liu, D., & Piao, G. (2024). Investigation on the activity of Ni doped CeO₂ for solar thermochemical water splitting combined

- with partial oxidation of methane. *International Journal of Hydrogen Energy*, 62, 1077-1088.
- Luo, H., Barrio, J., Sunny, N., Li, A., Steier, L., Shah, N., ... & Titirici, M. M. (2021). Progress and perspectives in photo-and electrochemical-oxidation of biomass for sustainable chemicals and hydrogen production. *Advanced Energy Materials*, 11(43), 2101180.
- Manjula, N., Balaji, R., Ramya, K., & Rajalakshmi, N. (2020). Hydrogen production by electrochemical methanol reformation using alkaline anion exchange membrane based cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(17), 10304-10312.
- Mayadevi, T. S., Goo, B. H., Paek, S. Y., Choi, O., Kim, Y., Kwon, O. J., ... & Kim, T. H. (2022). Nafion composite membranes impregnated with polydopamine and poly (sulfonated dopamine) for high-performance proton exchange membranes. *ACS omega*, 7(15), 12956-12970.
- Mehmeti, A., Angelis-Dimakis, A., Muñoz, C. B., Graziadio, M., & McPhail, S. J. (2018). Eco-thermodynamics of hydrogen production by high-temperature electrolysis using solid oxide cells. *Journal of Cleaner Production*, 199, 723-736.
- Mehrpooya, M., & Habibi, R. (2020). A review on hydrogen production thermochemical water-splitting cycles. *Journal of Cleaner Production*, 275, 123836.
- Mohammed, H., Al-Othman, A., Nancarrow, P., Elsayed, Y., & Tawalbeh, M. (2021). Enhanced proton conduction in zirconium phosphate/ionic liquids materials for high-temperature fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(6), 4857-4869.
- Murugan, A., & Brown, A. S. (2015). Review of purity analysis methods for performing quality assurance of fuel cell hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(11), 4219-4233.
- Ni, J., Wen, Y., Pan, D., Bai, J., Zhou, B., Zhao, S., ... & Zeng, Q. (2023). Light-driven simultaneous water purification and green energy production by photocatalytic fuel cell: A comprehensive review on current status, challenges, and perspectives. *Chemical Engineering Journal*, 473, 145162.
- Obasi, L. A., & Ajah, A. N. (2016). Wastewater Treatment and Bio-Electricity Generation via Microbial Fuel Cell Technology Operating with Starch Proton Exchange Membrane. *Int. J. Chem. Mol. Nucl. Mater. Metall. Eng.*, 10(12), 1482-1486.

- Ourya, I., & Abderafi, S. (2022, April). Technology comparison for green hydrogen production. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1008, No. 1, p. 012007). IOP Publishing.
- Palanisamy, G., Im, Y. M., Muhammed, A. P., Palanisamy, K., Thangarasu, S., & Oh, T. H. (2023). Fabrication of cellulose acetate-based proton exchange membrane with sulfonated SiO₂ and plasticizers for microbial fuel cell applications. *Membranes*, 13(6), 581.
- Pan, J., Sun, Y., Li, W., Knight, J., & Manthiram, A. (2013). A green lead hydrometallurgical process based on a hydrogen-lead oxide fuel cell. *Nature communications*, 4(1), 2178.
- Panchenko, V. A., Daus, Y. V., Kovalev, A. A., Yudaev, I. V., & Litt, Y. V. (2023). Prospects for the production of green hydrogen: Review of countries with high potential. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(12), 4551-4571.
- Pandiarajan, T., Berchmans, L. J., & Ravichandran, S. J. R. A. (2015). Fabrication of spinel ferrite based alkaline anion exchange membrane water electrolyzers for hydrogen production. *RSC Advances*, 5(43), 34100-34108.
- Pandiyan, A., Uthayakumar, A., Subrayan, R., Cha, S. W., & Krishna Moorthy, S. B. (2019). Review of solid oxide electrolysis cells: a clean energy strategy for hydrogen generation. *Nanomaterials and energy*, 8(1), 2-22.
- Pati, S., Gopalan, S., & Pal, U. B. (2011). A solid oxide membrane electrolyzer for production of hydrogen and syn-gas from steam and hydrocarbon waste in a single step. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(1), 152-159.
- Pati, S., Yoon, K. J., Chin, J., Gopalan, S., & Pal, U. (2009). Solid Oxide Membrane Electrolyzer Utilizing the Energy Value in Solid and Gaseous Reductant for Hydrogen Production. *ECS Transactions*, 19(10), 1.
- Punniakotti, G., Sivasubramanian, G., Gurusamy Thangavelu, S. A., & Deivanayagam, P. (2021). Sulfonated poly (vinyl alcohol)/fly ash composite membranes for polymer electrolyte membrane fuel cell applications. *Polymer-plastics technology and materials*, 60(5), 571-578.
- Pushkareva, I. V., Pushkarev, A. S., Grigoriev, S. A., Modisha, P., & Bessarabov, D. G. (2020). Comparative study of anion exchange membranes for low-cost water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(49), 26070-26079.
- Rajesh Banu, J., Mohamed Usman, T. M., Kavitha, S., YukeshKannah, R., Yogalakshmi, K. N., Sivashanmugam, P., ... & Kumar, G. (2021). A critical review on limitations and enhancement strategies associated with

- biohydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(31), 16565-16590.
- Rezk, H., Olabi, A. G., Abdelkareem, M. A., Alahmer, A., & Sayed, E. T. (2023). Maximizing green hydrogen production from water electrocatalysis: modeling and optimization. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(3), 617.
- Rosero-Chasoy, G., Rodríguez-Jasso, R. M., Aguilar, C. N., Buitrón, G., Chairez, I., & Ruiz, H. A. (2023). Green hydrogen production: a critical review. *Green Approach to Alternative Fuel for a Sustainable Future*, 381-390.
- Samrot, A. V., Rajalakshmi, D., Sathiyasree, M., Saigeetha, S., Kasipandian, K., Valli, N., ... & Shobana, N. (2023). A review on biohydrogen sources, production routes, and its application as a fuel cell. *Sustainability*, 15(16), 12641.
- Santoro, C., Lavacchi, A., Mustarelli, P., Di Noto, V., Elbaz, L., Dekel, D. R., & Jaouen, F. (2022). What is next in anion-exchange membrane water electrolyzers? Bottlenecks, benefits, and future. *ChemSusChem*, 15(8), e202200027.
- Sazali, N., Wan Salleh, W. N., Jamaludin, A. S., & Mhd Razali, M. N. (2020). New perspectives on fuel cell technology: A brief review. *Membranes*, 10(5), 99.
- Shah, S., Venkatramanan, V., & Prasad, R. (2019). Microbial fuel cell: Sustainable green technology for bioelectricity generation and wastewater treatment. In *Sustainable green technologies for environmental management* (pp. 199-218). Singapore: Springer Singapore.
- Sun, Z., & Sun, Z. Q. (2020). Hydrogen generation from methanol reforming for fuel cell applications: A review. *Journal of Central South University*, 27(4), 1074-1103.
- Tawalbeh, M., Al-Othman, A., Salamah, T., Alkasrawi, M., Martis, R., & El-Rub, Z. A. (2021). A critical review on metal-based catalysts used in the pyrolysis of lignocellulosic biomass materials. *Journal of Environmental Management*, 299, 113597.
- Tawalbeh, M., Farooq, A., Martis, R., & Al-Othman, A. (2024). Optimization techniques for electrochemical devices for hydrogen production and energy storage applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 52, 1058-1092.
- Tawalbeh, M., Shomope, I., Al-Othman, A., & Alshraideh, H. (2024). Prediction of hydrogen production in proton exchange membrane water electrolysis via neural networks. *International Journal of Thermofluids*, 24, 100849.

- Tiwari, B. R., & Ghangrekar, M. M. (2018). Electricity production during distillery wastewater treatment in a microbial fuel cell equipped with low cost PVA-nafion-borosilicate membrane. *J. Clean Energy Technol*, 6(2), 155-158.
- Trinke, P., Haug, P., Brauns, J., Bensmann, B., Hanke-Rauschenbach, R., & Turek, T. (2018). Hydrogen crossover in PEM and alkaline water electrolysis: mechanisms, direct comparison and mitigation strategies. *Journal of The Electrochemical Society*, 165(7), F502.
- Tripathi, S., Tripathi, M., & Chawla, P. (2024, August). TiO₂-CeO₂ Admixed Photoelectrode for Optimization of Hydrogen Production in Regard to Photoelectrochemical Solar Cell. In *Transition Towards a Carbon Free Future: Selected Papers from the World Renewable Energy Congress (WREC) 2023* (pp. 139-146). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Vincent, I., Kruger, A., & Bessarabov, D. (2018). Hydrogen production by water electrolysis with an ultrathin anion-exchange membrane (AEM). *International Journal of Electrochemical Science*, 13(12), 11347-11358.
- Visser, E. D., Seroka, N. S., & Khotseng, L. (2023). Catalytic properties of biochar as support material potential for direct methanol fuel cell: A review. *ACS omega*, 8(44), 40972-40981.
- Wang, Y., Pang, Y., Xu, H., Martinez, A., & Chen, K. S. (2022). PEM Fuel cell and electrolysis cell technologies and hydrogen infrastructure development—a review. *Energy & Environmental Science*, 15(6), 2288-2328.
- Xu, Y., Cai, S., Chi, B., & Tu, Z. (2024). Technological limitations and recent developments in a solid oxide electrolyzer cell: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 50, 548-591.
- Yu, M., Wang, K., & Vredenburg, H. (2021). Insights into low-carbon hydrogen production methods: Green, blue and aqua hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(41), 21261-21273.
- Zhang, D., De Santiago, H. A., Xu, B., Liu, C., Trindell, J. A., Li, W., ... & Luo, J. (2023). Compositionally complex perovskite oxides for solar thermochemical water splitting. *Chemistry of Materials*, 35(5), 1901-1915.
- Zhang, K., Zhao, X., Chen, S., Chang, L., Wang, J., Bao, W., & Wang, H. (2018). Direct electrolysis of Bunsen reaction product HI/H₂SO₄/H₂O/toluene mixture for hydrogen production: Pt electrode characterization. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(30), 13702-13710.
- Zhang, W., Hu, X., Zhou, Y., Luo, Z., Nam, G., Ding, Y., ... & Liu, M. (2022). A solid oxide fuel cell runs on hydrocarbon fuels with exceptional durability and power output. *Advanced Energy Materials*, 12(47), 2202928.



BÖLÜM 11

Toprak Kalitesini ve Verimini İyileştirmek İçin Sürdürülebilir Bir Yaklaşım: Biyokömür Uygulamaları

Elif YAMAN ÇAMLI¹

1. GİRİŞ

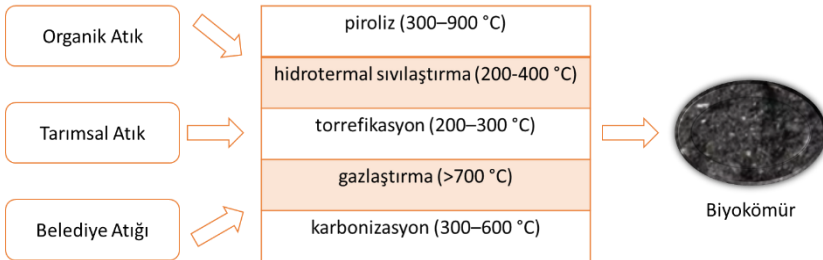
Biyokömür ekonomik faaliyetlerde ve çevresel sürdürülebilirlikte önemli bir rol oynamaktadır ve öneminin gelecekte daha da artması beklenmektedir (Vandana vd., 2025). Sınırlı oksijen koşulları altında biyokütlenin ısı bozunması, biyokömür olarak adlandırılan karbon açısından zengin bir katı ürün elde edilmesini sağlar (Hu vd., 2021; Yaashikaa vd., 2020). Biyokömür, organik atık, tarımsal atık ve belediye atığı gibi çeşitli hammaddelerden elde edilebilir (Bedia vd., 2018; Ravindran vd., 2018). Biyokömürün enerji depolama (Özbay vd., 2024), katalizör (Yaman, 2023a), katalizör destek malzemesi (Yaman vd., 2022), biyolojik mücadele (Yaman vd., 2023b) toprak iyileştirme vb. gibi (Yaman vd., 2019) gibi pek çok uygulama alanı mevcuttur (Şekil 1). Ayrıca, biyokömür atık sudan toksik ve inatçı kirleticilerin giderilmesinde de çok etkilidir (Bolan vd., 2022; Medha vd., 2025; Zhang vd., 2025). Biyokömürün bu uygulama alanlarındaki verimi, sahip olduğu yüzey özellikleri ve fizikokimyasal özelliklerine bağlıdır. Ayrıca üretimi sırasında uygulanan sıcaklık, kalış süresi, ısıtma hızı, basınç ve kullanılan hammadde türü de dahil olmak üzere reaksiyon koşulları, biyokömürün miktarını ve özelliklerini etkileyebilir (Yaman vd., 2023; Santoso vd., 2020).

¹ Doç. Dr., Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Meslek Yüksekokulu
Alternatif Enerji Kaynakları Teknolojisi Programı, ORCID: 0000-0002-1052-8779



Şekil 1. Biyokömürün bazı uygulama alanları

Günümüz çalışmalarındaki mevcut odak noktası ise sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu olarak çeşitli alanlarda biyokömür uygulamalarını geliştirmek için kirletmeyen, yeşil üretim süreçleridir (Vandana vd., 2025). Yaygın olarak kullanılan biyokömür üretim süreçleri arasında piroliz (300–900 °C) (Lin vd., 2025), hidrotermal sıvılaştırma (200–400 °C) (Hussain vd., 2025) torrefikasyon (200–300 °C) (Krysanova vd., 2022), gazlaştırma (>700 °C) (Sun vd., 2025), ve karbonizasyon (300–600 °C) (Yaman vd., 2019) bulunur (Şekil 2). Bu süreçler farklı reaksiyon ortamlarında gerçekleştirildikleri için elde edilen her bir biyokömürün fizikokimyasal özellikleri de birbirinden farklıdır.



Şekil 2. Biyokömürün hammadde kaynakları ve üretim metotları

Biyokömür üretim reaksiyonlarında kullanılan ısıtma hızı (5–50 °C/dk), hammaddenin reaktörde kalma süresi (5–120 dk) ve taşıyıcı gazlar (N₂, CO₂ veya buhar ve diğer inert gazlar) gibi temel çalışma koşulları da biyokömür verimini (%20–80 ağırlık) ve bileşimlerini önemli ölçüde etkiler. Biyokömürün morfolojik, yapısal, fiziksel ve kimyasal karakterizasyonu, uygulama alanını belirlemek için çok önemlidir (Vandana vd., 2025).

Sürdürülebilir tarım tanımıyla beraber, biyokömürün tarım alanında kullanımı oldukça önem kazanmıştır. Bu çalışma ise, biyokömürün tarımsal alanda hangi amaçlarla kullanıldığını ve elde edilen sonuçları özetlemektedir.

2. TOPRAK UYGULAMALARINDA BİYOKÖMÜR

Biyokömürün üstün fizikokimyasal ve yüzey özellikleri, toprak uygulamalarında kullanılması için biyokömürü ön plana çıkarmaktadır. Sahip olduğu gözenekli yapı ve yüksek yüzey alanı, toprağın su tutma kapasitesini artırır, mikroorganizma faaliyetleri için daha uygun bir yaşam alanı sağlar, toprağın havalanmasını sağlayarak kök gelişimini destekler, bitki besinlerinin tutulmasını sağlar ve suyun drenajını dengeler (Yaman vd., 2019; Yaman vd., 2023b). Biyokömür uygulaması ayrıca, toprak verimliliğini ve ürün verimini artırabilir. En önemli etkilerinden biri ise CH₄ emisyonunu azaltarak sera gazı etkisinin azalmasına yardımcı olabilir (Liu vd., 2025)

2.1. Biyokömür Uygulamasının Toprağın Fizikokimyasal Özellikleri Üzerine Etkisi

Toprak tuzlanması, gıda güvenliği ve arazi kullanım verimliliğinin önündeki başlıca kısıtlamalardan biridir (Tarolli vd., 2024). Bu durum esas olarak araziye tuzlu su girişi, bitki örtüsünün tahribi ve yanlış sulama yöntemleri gibi doğal ve beşeri faktörlerden etkilenmektedir (Guo vd., 2023, Zhang vd., 2025b). Toprak tuzlanması, düşük toprak besin maddesi ve kullanım verimliliği sorunlarına yol açabilir ve bu nedenle ürün verimini de etkiler (Zhang vd., 2024). Toprağın hidrolik özellikleri, organik karbon yüzdesi, asitliği, kullanılabilir K içeriği gibi diğer fizikokimyasal özellikler de toprak verimliliği üzerinde önemli rol oynar. Bu nedenle, toprakların mikro çevresini iyileştirmek için uygun teknolojilerin geliştirilmesi hayati önem taşımaktadır, çünkü bu, ekilebilir arazi kaynaklarının genişlemesini kolaylaştırarak gıda güvenliğini garanti altına almaktadır. Bu amaçla literatürde biyokömür uygulamalarına sıklıkla rastlanmaktadır. Wu vd., 2025; samandan elde ettikleri biyokömürü tuzla kirlenmiş pirinç tarlasına uygulamışlardır. Amonyak oksitleyen arkeler ve amonyak oksitleyen bakteriler nitrifikasyon sürecini kolaylaştırarak pirinç bitkisinin azot almasına yardımcı olur ve pirinç verimini artırır. Özellikle %3 biyokömür uygulanan toprakta AOA ve AOB popülasyonu önemli ölçüde artarak, toprağın fizikokimyasal özellikleri iyileşmiştir. Meng vd., 2025; yaptıkları 4 yıllık saha çalışmasında toprak verimliliğini artırmak ve mısır verimini iyileştirmek için toprağa saman ve biyokömür uygulaması ile karbon zenginleştirme mekanizmalarının iyileştirilmesi üzerine çalışmışlardır. Saman ve biyokömürün toprağa birlikte uygulanması ile elde edilen sinerjik etki topraktaki organik karbon sekestrasyonunu artırmıştır. Guo vd., 2025; farklı sıcaklıklarda elde edilen biyokömürün toprağın fiziksel ve hidrolik özellikleri üzerine etkisini inceledikleri çalışmalarında biyokömür uygulamasının toprak hacim yoğunluğunu azalttığını, toprak gözenekliliğini artırdığını, doymuş su içeriği, tarla kapasitesi, bitkiye yarayışlı su ve nem içeriği gibi toprağın hidrolik özelliklerini iyileştirdiği sonucuna varmışlardır. Ancak yüksek sıcaklıklarda elde

edilen biyokömür toprağın hidrolik özelliklerini geliştirmemiştir. Lu vd., 2025; biyokömürün asidik toprakları iyileştirme mekanizması üzerine deneysel ve sayısal simülasyon çalışmaları gerçekleştirmiştir. Toprağa eklenen %10 biyokömür pH'ı 5,23'ten 6,81'e yükseltirken elektriksel iletkenliği 173,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ değerine azaltmıştır. Biyokömürün gözenekli yapısı ise makro agregat ($D_p > 0,25$ mm) oluşumunu %35 artırarak toprağın su tutma kapasitesini iyileştirmiştir. Biyokömürün asidik toprak kalitesini ve su tutma kapasitesini iyileştirdiği farklı çalışmalar da literatürde mevcuttur (Yaman vd., 2019; Ren vd., 2025). Biyokömürün toprağın hidrolik özellikleri üzerindeki uzun vadeli etkileri üzerine çalışan araştırmacılar elde edilen 1-10 yıllık saha deneyi verilerinin istatistiksel bir meta-analizini gerçekleştirmiştir. Biyokömür uygulanmış toprağın gözeneklilik, hidrolik iletkenlik, tarla kapasitesi, kullanılabilir su kapasitesi gibi özelliklerinin incelenmesiyle, odunsu biyokömür için önerilen uygulama oranı 20-40 ton/ha olarak belirlenmiştir (Jiang vd., 2025). Zhang vd., 2025 ise azotlu gübre ve biyokömürün toprak N_2O emisyonları ve mikrobiyal topluluklar üzerine etkilerini belirlemek için farklı gübre ve farklı biyokömür oranlarında çalışmışlardır. Daha yüksek azot gübresi içeren biyokömür N_2O emisyonunu artırırken, daha yüksek uygulama oranlarındaki biyokömür toprağın mikrobiyal çeşitliliğini artırmıştır. Sharma vd., 2025; biyokömürün toprak özellikleri ve topraktaki besin maddelerinin konsantrasyonları üzerine etkisini incelemek için pamuk üretiminde kullanılan toprağa 0-40 Mg/ha arasında değişen oranlarda biyokömür uygulaması yapmışlardır. Bu uygulama, kontrol örneğine kıyasla topraktaki $\text{NO}_3\text{-N}$ konsantrasyonunu, nadas dönemindeki nitrat sızıntısını ve PO_4^{3-}P konsantrasyonunu azaltmıştır. Tarımsal sistemlerdeki P kaybı, önemli ölçüde su ötrofikasyonuna sebep olmaktadır. Wang vd., 2025 yaptıkları çalışmada toprak agregasyonunun artırılması ve kolloidal fosfor kaybının azaltılması için toprağa saman biyokömürü uygulamışlardır. Topraktaki saman biyokömürü küçük ve mikro agregaların oranını artırırken, toplam ve kolloidal P konsantrasyonlarını ve bunların tarımsal akıştaki kayıp yüklerini azaltmıştır.

2.2. Biyokömür Uygulamasının Topraktaki Azot Kaybına ve Azot Döngüsüne Etkisi

Ekim alanlarındaki aşırı azot (N) kayıpları, sürdürülebilir tarımsal ve ekolojik kalkınma için ciddi tehditlerdir. Son zamanlarda biyokömür, topraktaki azot kayıplarını azaltmak için ekim alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (He vd., 2025). Wu vd., (2025); yaptıkları çalışmada tuzlu topraktaki azot döngüsü kapasitesini artırmak için pirinç yetiştirilen toprağa saman biyokömürü eklemiştir. Amonyak oksitleyen arkeler ve amonyak oksitleyen bakteriler azot ile önemli bir korelasyon göstermiş ve pirinç verimi olumlu etkilenmiştir. He vd., (2025) yaptıkları çalışmada, topraktaki azot kayıplarının önlenmesi için saman ve biyokömür uygulamasını karşılaştırmıştır. Kireçli mor topraklarda kütlece %3

biyokömür içeriği, N döngüsünü geliştirmiş, N kayıplarını azaltmış ve ürün verimini iyileştirmiştir. Saman uygulaması ile kıyaslandığında üstün performans göstermiştir. Pidlisnyuk vd., (2025) arıtma çamuru ve atık biyokütleden ayrı reaksiyon şartlarında ürettikleri biyokömür örneklerini hidrokarbonla kirlenmiş toprağa uygulayarak, biyokömürle zenginleştirilmiş topraklarda toplam azot içeriğinin genellikle arttığını belirlemişlerdir. Biyokömürün aşırı gübre kullanımını azaltmada büyük bir potansiyeli vardır. Zhang vd., (2025) yaptıkları çalışmada biyokömür ile gübreyi toprağa birlikte uygulayarak, kümülatif N_2O emisyonu üzerine etkilerini incelemişlerdir. Bu uygulama ile yağ tohumu sezonunda toprak kümülatif N_2O emisyonu %55-61,5 ve soya fasulyesi sezonunda ise %200-245 oranında artmıştır. Pamuk üretiminde biyokömürün toprak besin elementleri üzerine etkisinin incelendiği çalışmada, biyokömür uygulamaları, nadas döneminde 46 cm ve 81 cm derinlikteki kontrole kıyasla topraktaki NO_3-N kayıplarını sırasıyla %49-87 ve %42-102 oranında azaltmıştır (Sharma vd., 2025).

2.3. Biyokömür Uygulamasının Topraktaki Hidrokarbon, Ağır Metal ve Mikroplastik Kirliliği Üzerine Etkisi

Toprakta bulunabilen kirliliklerin giderilebilmesi için, gözenekli ve karbon açısından zengin bir malzeme olan biyokömür, mükemmel adsorpsiyon performansı, çevre dostu olması ve düşük maliyet avantajı gibi avantajları nedeniyle son yıllarda önem kazanmaktadır. Biyokömürün sahip olduğu yüksek özgül yüzey alanı, geniş gözenek yapısı (mikro ve mezo gözenekler), farklı yüzey fonksiyonel grupları (karboksil grupları, hidroksil grupları, fenolik hidroksil grupları vb.) ve ayarlanabilir yüzey yükü özellikleri bu uygulama alanında kullanılması için biyokömürü ön plana çıkarmaktadır (Xin vd., 2025). Topraktaki ağır metal kirliliği, tarım endüstrisi için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır (Ye vd., 2025). Sun vd. (2022), biyokömürün Cd^{2+} adsorpsiyon mekanizmasını nicel olarak analiz etmiş ve biyokömürün, topraktaki Cd^{2+} adsorpsiyonunu kontrol örneğine göre %58 artırdığını belirlemiştir. Li vd. (2022), Cu^{2+} ve Cd^{2+} 'nin adsorpsiyonundan önce ve sonra biyokömürün fonksiyonel grup değişimlerini XRD ile analiz etmiş ve adsorpsiyondan sonra iki ağır metalin çökmesine karşılık gelen iki yeni pik noktasının ortaya çıktığını bulmuşlardır. Bu iki yeni pik, yüzey çökmesinin biyokömür tarafından ağır metal adsorpsiyonunun ana mekanizması olduğunu göstermektedir. Dong vd. (2013), biyokömür tarafından Hg^{+2} adsorpsiyonunun ana mekanizmasını inceledikleri çalışmalarında, biyokömürün adsorpsiyon performansını, karboksil gruplarının fenolik hidroksil grupları veya grafit benzeri alanlarla kompleksleşmesi olduğunu belirlemiştir. Lu vd. (2012), adsorpsiyonun kantitatif analiziyle, biyokömür tarafından Pb^{+2} adsorpsiyonunun esas olarak hidroksil ve karboksil fonksiyonel gruplarıyla koordinasyon (toplam adsorplanan Pb^{+2} miktarının %38,2-42,3'ü) ve mineral

yüzeyinde eş-çökme veya kompleksleşme (toplam adsorplanan Pb^{+2} miktarının %57,7-61,8'i) yoluyla ilerlediğini belirtmiştir. Mikroplastikler, yaygın olarak bulunmaları ve çeşitli kökenleri nedeniyle önemli çevresel zorluklar oluşturmakta ve ekosistem bozulması konusunda endişelere yol açmaktadır. Tarımsal ekosistemlerde istilacı yabancı türlerin ve MP'lerin bir arada bulunması, toprak ve bitki sağlığına yönelik tehditleri daha da artırmaktadır. Iqbal vd. (2025), S. Canadensis bitkisinden türettikleri biyokömürün polietilen (PE) ve polilaktik asit (PLA) ile kirlenmiş topraklarda artan mikrobiyal biyokütle, yükselen inorganik azot seviyeleri ve gelişmiş enzim aktivitesi de dahil olmak üzere toprak kalitesini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. $ZnCl_2$ ve $AlCl_3$ ile modifiye edilmiş S. canadensis biyokömürü ise MP toksisitesini azaltmada S. canadensis biyokömürüne ve biyokömsüz kontrol uygulamalarına göre daha iyi etkinlik göstermiştir. Zou vd. (2025), potasyum-silisyum-kalsiyum mineral gübresinin pirinç kabuğu biyokömürü ile birlikte uygulanmasının topraktaki Cd ve Pb'nin immobilizasyonu üzerindeki sinerjik etkilerini incelemiştir. Çok bileşenli bir çözelti içerisindeki biyokömür ve mineral gübre, tekli çözeltilerle karşılaştırıldığında Cd ve Pb adsorpsiyon seviyelerinin çok bileşenli çözelti içerisinde daha az olduğu görülmüştür. Bu da Cd ve Pb arasında adsorpsiyon yüzeyleri için bir rekabet olduğunu göstermektedir. Petrol hidrokarbonlarıyla (PH) toprak kirliliği, kalıcı bir çevresel sorun teşkil etmektedir. Pidlisnyuk vd. (2025),

2.4. Biyokömür Uygulamasının Bitki Verimi Üzerine Etkisi

Biyokömür, yüksek gözenekliliği nedeniyle kullanılabilir su kapasitesini artırarak bitki büyümesi için uygun bir su ortamı sağlar (Jeffery vd. 2011). Mısır verimini iyileştirmek için saman ve biyokömür uygulaması yapan Meng vd. (2025), hiçbir düzenleyici uygulama yapılmamasıyla karşılaştırıldığında saman ve biyokömür uygulamasının dört yıllık ortalama tane verimini sırasıyla %10,52 ve %18,47 oranında artırdığını belirlemiştir. Guo vd. (2025), farklı piroliz sıcaklıklarında elde ettikleri biyokömürü, patates tarım arazisine uygulamıştır. Optimum biyokömür uygulamasının 500 °C piroliz sıcaklığı ve 20 ton ha⁻¹ olduğu çalışmada, biyokömür uygulamasının bitkiye uygun suyu artırarak patates verimini artırdığı belirlenmiştir. Yer fıstığı yetiştiriciliğinde bakteri yüklenmiş biyokömür uygulaması yapan Li vd. (2025), bu iyileştirmenin toprak organik madde içeriğini ve kullanılabilir potasyum içeriğini önemli ölçüde artırdığını ve yer fıstığı baklalarının kuru ağırlığını kayda değer bir şekilde iyileştirdiğini belirlemiştir. Pamuk üretiminde biyokömürün toprak özellikleri ve toprak besin elementleri üzerine etkisini inceleyen Sharma vd. (2025), biyokömürün topraktaki besin kayıplarını azalttığını, toprak özelliklerini iyileştirdiğini ve sürdürülebilir pamuk üretimi için alternatif bir toprak iyileştirme stratejisi olduğunu belirtmişlerdir. Wang vd. (2025), yaptıkları çalışmada çay ve tıbbi bitki

yetiştirme sistemlerinde saman biyokömürü ile toprak agregasyonunun artırılması ve koloidal fosfor kaybının azaltılmasını hedeflemişlerdir. Elde ettikleri deneysel sonuçlara göre, biyokömürün çay ve tıbbi bitki yetiştirme sistemlerinde P kaybını azaltmak için etkili ve sürdürülebilir bir yöntem olduğunu vurgulamışlardır. Narenciye bahçesi toprakları çoğunlukla asidik olduğundan, düşük pH kaynaklı ayrışma ve buna bağlı sera gazı emisyonları yoluyla topraktaki organik madde kaybı, biyokömür ilavesiyle azaltılabilir. Biyokömür alkali yapısı nedeniyle, topraktaki organik madde miktarının azalmasını engelleyerek toprak verimliliğini artırır, sera gazı emisyonlarını azaltır, besin depolamasını iyileştirir ve besin döngüsü hızını geliştirerek karbonu tutar. Toprak sağlığının sürdürülebilir verimlilik için birincil öneme sahip olduğu narenciye bahçeleri bağlamında, biyokömürün entegrasyonu umut verici olasılıklar sunmaktadır (Qasim vd., 2025). Liu vd., 2025; çeltik tarlasına uyguladıkları biyokömür uygulamasının alternatif ıslatma ve kurutma altında metan emisyonları ve pirinç verimi üzerine etkilerini araştırmıştır. Yapılan tarla deneylerinden elde edilen sonuçlara göre, biyokömür toprak verimliliğini ve verimini artırıp, CH₄ emisyonlarını azaltmıştır. Biyokömürün tarımsal alanlardaki uygulamaları ve elde edilen bazı sonuçlar Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1. Biyokömürün tarımsal alanlardaki uygulamalarından elde edilen bazı sonuçlar

Uygulama Amacı	Etkisi
Fizikokimyasal özellikleri üzerine etkisi	Tuzluluk azalır. Organik karbon sekestrasyonunu artırır. Toprak hacim yoğunluğunu azaltır. Toprak gözenekliliğini artırır. Doymuş su içeriği, tarla kapasitesi, bitkiye yarayışlı su ve nem içeriği özelliklerini iyileştirir.
Azot döngüsü üzerine etkisi	Topraktaki azot kayıplarını azaltır. Azot döngüsünü geliştirir. Aşırı gübre kullanımını azaltır.
Kirleticiler üzerine etkisi	Mükemmel adsorpsiyon kapasitesi özelliği ile kirleticileri tutar. Metal, hidrokarbon, mikroplastik gibi kirleticilerin giderilmesi için etkilidir.
Bitki verimi üzerine etkisi	Kullanılabilir su kapasitesini artırarak bitki büyümesi için uygun bir su ortamı sağlar. Topraktaki besin kayıplarını azaltarak, büyüme hızını geliştirir.
Çevreye etkisi	Sera gazı emisyonunu azaltır. Mikroorganizmalar için uygun yaşam alanı oluşturarak, ekosisteme katkı sağlar.

3. ZORLUKLAR VE KISITLAMALAR

Biyokömürün uzun vadeli uygulanması sırasında kirleticilerin sızma riski ile karşılaşılabilir. Biyokömür genellikle yüksek sıcaklıkta piroliz, gazlaştırma veya hidrotermal yöntemle hazırlanır; bu yöntemde polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH'lar) ve eser metaller gibi potansiyel kirleticilerin yapı içindeki bağlı oranları artabilir. Uygulama alanına göre, daha yüksek verimlilikle kullanılabilmesi için biyokömüre bazı modifikasyon işlemleri uygulanabilir. Biyokömür modifiye edilirken, çeşitli organik çözücüler, metal tuzları, metal oksitler ve diğer kimyasal maddeler kullanılır ve bu da kirleticilerin birikme riskini daha da artırabilir (Ye vd., 2025). Ayrıca, PAH'lar ekim alanlarındaki bitkilerde oksidatif strese neden olacak kalıcı serbest radikaller oluşturabilir (Hale vd., 2012; Liao vd., 2014). Bu nedenle, biyokömür daha kararlı bir hale getirilmesi için herhangi bir son işlem uygulanmadan doğrudan toprağa uygulanırsa, biyokömürün uzun süreli yaşlanması ve bozunmasından sonra, içindeki kirleticiler toprağa salınabilir veya çökeltme yoluyla yeraltı su kaynaklarına karışabilir ve bu da çevre kirliliği için önemli bir tehdit haline gelebilir (Das vd., 2023).

Biyokömür farklı metotlarla (mekanik öğütme (örneğin, bilyalı öğütme) veya ultrasonik işlem) nano-boyuta getirilerek nano-biyokömür elde edilebilir (Raczkiwicz vd., 2024). Biyokömür ile karşılaştırıldığında, nano-biyokömür daha üstün adsorpsiyon kapasitesine sahiptir. Nano ölçekli parçacık boyutu, nano-biyokömüre, biyokömürün 2-5 katı daha yüksek bir özgül yüzey alanı kazandırarak kirleticili adsorpsiyonu için daha fazla aktif alan sağlar. Ayrıca, nano-biyokömür üretimi sırasında kullanılan öğütme işlemi, yüzeyinde ek fonksiyonel gruplar (örneğin, -COOH, -OH) oluşmasını sağlayarak hem organik hem de inorganik kirleticilere olan ilgisini daha da artırır (Sani vd., 2023; Pathak vd., 2024). Bu özellikler, nano-biyokömüre su ve gübre tutulumunu iyileştirme, ağır metal kirliliğini azaltma ve toprak yapısını iyileştirme konusunda daha büyük bir potansiyel sağlar. Fakat, nano-boyutun da bazı dezavantajları ve dolayısıyla nano-biyokömürün kullanımını kısıtlayan özellikleri vardır. Nano-biyokömür, biyokömürün kendisinden kaynaklanan kirlenmenin yanı sıra, yüksek özgül yüzey alanı, belirgin nano yapısı, yüksek katalitik aktivitesi ve toprak ortamındaki yüksek hareketliliği nedeniyle kirlenmelere karşı güçlü bir afiniteye sahiptir. Ramanayaka vd. (2020), yaptıkları çalışmada nano-biyokömür üzerinde glifosat, higromisin, krom ve kadmiyum adsorpsiyonunu belirlemişlerdir. Nanomalzemeler içine kapsüllenmiş gübreler, hücre duvarı gözenekleri yoluyla doğrudan bitki hücrelerine nüfuz etme yeteneğine sahiptir ve böylece bitki metabolik yollarına entegrasyonlarını kolaylaştırır (Joseph vd., 2021). Nano-biyokömürün fitotoksitesini yeterince incelenmemiştir ve bitki sistemleri üzerindeki etkilerini inceleyen sınırlı sayıda araştırma vardır. Çalışmalar,

nanomalzemelere maruz kalmanın bitki biyolojisinin büyüme ve gelişme parametreleri, fizyolojik ve biyokimyasal süreçler gibi birçok yönünü önemli ölçüde etkileyebileceğini ortaya koymuştur (Priester vd., 2017, Verma vd., 2018). Bu etkiler birlikte biyokütle üretiminin azalmasına ve verimin düşmesine sebep olabilir ve bu açıdan tarımsal uygulamalarda kapsamlı bir risk değerlendirmesi mutlaka yapılmalıdır. Nano-biyokömürün toprak mikrobiyal toplulukları üzerindeki etkileri de mevcuttur. Toprak mikrobiyal topluluklarının nano-biyokömüre verdiği farklı tepkiler, nanopartikül maruziyetinin dozu ve süresinden ve ayrıca toprağın doğasından kaynaklanabilir (Zhang vd., 2025). Mahmoud vd. (2020), nano-biyokömürün toprak mineralleriyle etkileşiminin fosfor gibi makro besin maddelerinin emilimini artırabileceğini bildirmiştir. Toprak besin maddesi bulunabilirliğindeki değişiklikler, toprak mikrobiyal ekolojisindeki değişikliklerin temel bir itici gücüdür ve mikrobiyal popülasyon dinamiklerini, enzimatik aktiviteyi ve topluluk kompozisyonunu önemli ölçüde etkiler. Bahsedilen bu teknik zorluklar, nano-biyokömürün geniş ölçekli saha uygulamasını kısıtlamaktadır. Buna göre, biyokömür ve nano-biyokömür uygulamasında hedeflenen iyileştirmeye göre optimum koşullarda biyokömür üretim ve uygulaması sağlanarak, potansiyel dezavantajlardan kaçınmak için önemlidir.

4. SONUÇ

Benzersiz gözenek yapısı, yüksek özgül yüzey alanı ve bol miktarda yüzey fonksiyonel grubu nedeniyle biyokömür toprak uygulamalarında farklı amaçlar için kullanılabilir. Biyokömürün toprak uygulamalarındaki avantajları sıralanacak olursa (i) Asidik toprakları iyileştirebilir (ii) Sera gazı emisyonlarını azaltır ve karbon (C) sekestrasyonuna katkıda bulunur (iii) Topraktaki besin kaybını etkili bir şekilde azaltır (iv) Toprağın kimyasal özelliklerini iyileştirir ve mikrobiyal aktiviteyi artırır (v) Ürün verimine katkıda bulunur (vi) Toprağın su ve gübre tutma kapasitesini artırır. Tüm bu avantajlarının yanında uzun vadede kullanımı açısından daha ayrıntılı bir incelenmesi gereken bazı dezavantajları da mevcuttur. Bu sebeple, gelecekteki araştırmalar, biyokömürün uzun vadeli ekolojik etkilerini açıklamak ve sürdürülebilir çevre yönetimi için bilimsel bir temel sağlamak amacıyla çok ölçekli deneyleri modellemeyle birleştirmelidir. Kritik bilgi boşluklarını gidermek için toksikoloji, agronomi ve biyojeokimyayı entegre eden çok disiplinli yaklaşımlar gereklidir.

5. KAYNAKLAR

- Bedia, J., Peñas-Garzón, M., Gómez-Avilés, A., Rodríguez, J. J., & Belver, C. (2018). A review on the synthesis and characterization of biomass-derived carbons for adsorption of emerging contaminants from water. *C*, 4(4), 63.
- Bolan, N., Hoang, S. A., Beiyuan, J., Gupta, S., Hou, D., Karakoti, A., ... & Van Zwieten, L. (2022). Multifunctional applications of biochar beyond carbon storage. *International Materials Reviews*, 67(2), 150-200.
- Das, S. K., Ghosh, G. K., & Avasthe, R. (2023). Biochar application for environmental management and toxic pollutant remediation. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(1), 555-566.
- Dong, X., Ma, L. Q., Zhu, Y., Li, Y., & Gu, B. (2013). Mechanistic investigation of mercury sorption by Brazilian pepper biochars of different pyrolytic temperatures based on X-ray photoelectron spectroscopy and flow calorimetry. *Environmental science & technology*, 47(21), 12156-12164.
- Guo, J., Ma, Y., Ding, C., Zhao, H., Cheng, Z., Yan, G., & You, Z. (2023). Impacts of tidal oscillations on coastal groundwater system in reclaimed land. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(10), 2019.
- Guo, J., Zhou, H., Jia, L., Wang, Y., & Fan, M. (2025). Effects of biochar from different pyrolysis temperatures on soil physical properties and hydraulic characteristics in potato farmland of arid and semi-arid regions. *Agricultural Water Management*, 313, 109483.
- Hale, S. E., Lehmann, J., Rutherford, D., Zimmerman, A. R., Bachmann, R. T., Shitumbanuma, V., ... & Cornelissen, G. (2012). Quantifying the total and bioavailable polycyclic aromatic hydrocarbons and dioxins in biochars. *Environmental science & technology*, 46(5), 2830-2838.
- He, D., Hu, D., Zhang, J., Dong, Z., & Zhu, B. (2025). Biochar's superior surface properties over straw contribute to soil N losses reduction and crop yield improvement. *Journal of Integrative Agriculture*.
- Hu, Q., Jung, J., Chen, D., Leong, K., Song, S., Li, F., ... & Wang, C. H. (2021). Biochar industry to circular economy. *Science of the Total Environment*, 757, 143820.
- Hussain, A., Kandari, A., Kotiyal, S., Kumar, V., Upadhyay, S., Ahmad, W., ... & Kumar, S. (2024). Hydrothermal liquefaction for biochar production from finger millet waste: its valorisation, process optimization, and characterization. *RSC advances*, 14(34), 24492-24502.
- Iqbal, B., Nazir, M. J., Lou, J., Wang, Y., Jho, E. H., Ye, M., ... & Du, D. (2025). Remediation of microplastics-contaminated agricultural soils by unmodified

- and modified biochar derived from *Solidago canadensis* L. *Process Safety and Environmental Protection*, 198, 107153.)
- Jeffery, S., Verheijen, F. G., van der Velde, M., & Bastos, A. C. (2011). A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, ecosystems & environment*, 144(1), 175-187.
- Jiang, Z., Huang, S., & Meng, Z. (2025). Long-term effects of biochar on the hydraulic properties of soil: A meta-analysis based on 1–10 years field experiments. *Geoderma*, 458, 117318.
- Joseph, S., Cowie, A. L., Van Zwieten, L., Bolan, N., Budai, A., Buss, W., ... & Lehmann, J. (2021). How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. *Gcb Bioenergy*, 13(11), 1731-1764.
- Krysanova, K., Krylova, A., Kulikova, M., Kulikov, A., & Rusakova, O. (2022). Biochar characteristics produced via hydrothermal carbonization and torrefaction of peat and sawdust. *Fuel*, 328, 125220.
- Li, A., Zhang, Y., Ge, W., Zhang, Y., Liu, L., & Qiu, G. (2022). Removal of heavy metals from wastewaters with biochar pyrolyzed from MgAl-layered double hydroxide-coated rice husk: Mechanism and application. *Bioresource Technology*, 347, 126425.
- Li, Q., Hu, Y., Zhang, X., Xu, L., & Xu, Z. (2025). Bacillus-loaded biochar as a dual strategy for Fusarium wilt control and soil health improvement in Peanut cultivation. *Applied Soil Ecology*, 213, 106325.
- Liao, S., Pan, B., Li, H., Zhang, D., & Xing, B. (2014). Detecting free radicals in biochars and determining their ability to inhibit the germination and growth of corn, wheat and rice seedlings. *Environmental science & technology*, 48(15), 8581-8587.
- Lin, H., Huang, Y., Jin, Q., Ma, T., & Dong, Y. (2025). Effects of biomass components and pyrolysis temperature on the adsorption properties of biochar for heavy metals: A review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 107321.
- Liu, C., Chen, T., Zhang, F., Han, H., Yi, B., Meng, J., ... & Ok, Y. S. (2025). Engineered biochar effects on methane emissions and rice yield under alternate wetting and drying in paddy soils. *Environmental Technology & Innovation*, 38, 104133.
- Lu, H., Zhang, W., Yang, Y., Huang, X., Wang, S., & Qiu, R. (2012). Relative distribution of Pb²⁺ sorption mechanisms by sludge-derived biochar. *Water research*, 46(3), 854-862.

- Lu, J., Ma, J., Wang, B., Ogino, K., Si, H., & Li, Y. (2025). Study on mechanism of biochar improving acid Soil: Multi-scale experiment and numerical simulation. *Journal of Environmental Management*, 389, 126083.
- Mahmoud, E., El Baroudy, A., Ali, N., & Sleem, M. (2020). Spectroscopic studies on the phosphorus adsorption in salt-affected soils with or without nano-biochar additions. *Environmental research*, 184, 109277.
- Medha, I., Chandra, S., Chauhan, S., Taksal, P. A., Tiwari, C. S., Mubarak, N. M., ... & Kumar, A. (2025). Distribution of antibiotics in water resources and the role of biochar in advanced water treatment techniques for antibiotics removal in the quest for cleaner water. *Separation and Purification Technology*, 377, 134194.
- Meng, W., An, N., Guan, S., Dou, S., Zhang, B., Zhu, W., & Yue, J. (2025). Unraveling mechanisms of carbon enrichment via straw and biochar application to enhance soil fertility and improve maize yield. *European Journal of Agronomy*, 169, 127673.
- Özbay, N., Yargıç, A. Ş., Yaman, E., Yarbay, R. Z., Dermenci, K. B., & Turan, S. (2024). Production of Si-doped biomass-derived materials: effect of support type, activation and doping conditions. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(24), 31369-31381.
- Pathak, H. K., Seth, C. S., Chauhan, P. K., Dubey, G., Singh, G., Jain, D., ... & Khoo, K. S. (2024). Recent advancement of nano-biochar for the remediation of heavy metals and emerging contaminants: Mechanism, adsorption kinetic model, plant growth and development. *Environmental Research*, 255, 119136.
- Pidlisnyuk, V., Newton, R. A., Ust'ak, S., Al Souki, K. S., Burdová, H., Trögl, J., ... & Mamirova, A. (2025). Assessing the potential of different biochars to support *Miscanthus* × *giganteus* phytoremediation in petroleum hydrocarbons-contaminated soil. *Industrial Crops and Products*, 229, 120971.
- Priester, J. H., Moritz, S. C., Espinosa, K., Ge, Y., Wang, Y., Nisbet, R. M., ... & Holden, P. A. (2017). Damage assessment for soybean cultivated in soil with either CeO₂ or Z
- Qasim, M., Babar, S., Younas, M. U., Rajput, N., Xia, X., Wang, J., ... & Jiang, C. (2025). Exploration of biochars for enhancing soil health, carbon sequestration, and greenhouse gas emission reductions under citrus cultivation. *European Journal of Agronomy*, 168, 127661.
- Rackiewicz, M., Bogusz, A., Pan, B., Xing, B., & Oleszczuk, P. (2024). Contrasting environmental impacts of nano-biochar and conventional biochar on various organisms. *Science of The Total Environment*, 957, 177629.

- Ramanayaka, S., Tsang, D. C., Hou, D., Ok, Y. S., & Vithanage, M. (2020). Green synthesis of graphitic nanobiochar for the removal of emerging contaminants in aqueous media. *Science of the Total Environment*, 706, 135725.
- Ravindran, R., Hassan, S. S., Williams, G. A., & Jaiswal, A. K. (2018). A review on bioconversion of agro-industrial wastes to industrially important enzymes. *Bioengineering*, 5(4), 93.
- Ren, X., Yang, W., Ye, L., Lin, S., Li, Y., Wang, W., ... & Peñuelas, J. (2025). Enhancing soil carbon sequestration in jasmine gardens: Differential effects of straw and biochar on mineral-associated and particulate organic carbon. *Journal of Environmental Management*, 389, 126282.
- Sani, M. N. H., Amin, M., Siddique, A. B., Nasif, S. O., Ghaley, B. B., Ge, L., ... & Yong, J. W. H. (2023). Waste-derived nanobiochar: a new avenue towards sustainable agriculture, environment, and circular bioeconomy. *Science of the Total Environment*, 905, 166881.
- Santoso, E., Ediati, R., Kusumawati, Y., Bahruji, H., Sulistiono, D. O., & Prasetyoko, D. (2020). Review on recent advances of carbon based adsorbent for methylene blue removal from waste water. *Materials Today Chemistry*, 16, 100233.
- Sharma, R. K., Singh, G., Jakhar, A., Dhillon, J., Anapalli, S. S., Nelson, K. A., & Kaur, G. (2025). Biochar impact on soil properties and soil solution nutrient concentrations under cotton production. *Journal of Environmental Management*, 386, 125660.)
- Sun, L., Gong, P., Sun, Y., Qin, Q., Song, K., Ye, J., ... & Xue, Y. (2022). Modified chicken manure biochar enhanced the adsorption for Cd²⁺ in aqueous and immobilization of Cd in contaminated agricultural soil. *Science of the Total Environment*, 851, 158252.
- Sun, K., Jia, S., Wei, X., Zhao, C., & Cai, N. (2025). Combining CO₂ capture and conversion with Ni-CaO-biochar for rice straw gasification. *Energy*, 137639.
- Tarolli, P., Luo, J., Park, E., Barcaccia, G., & Masin, R. (2024). Soil salinization in agriculture: Mitigation and adaptation strategies combining nature-based solutions and bioengineering. *Isience*, 27(2).
- Vandana, T. U., Tripathy, B. K., Mishra, R. K., Sharma, A., & Mohanty, K. (2025). A review on waste biomass-derived biochar: Production, characterisation, and advanced analytical techniques for pollutants assessment in water and wastewater. *Process Safety and Environmental Protection*, 107505.
- Verma, S. K., Das, A. K., Patel, M. K., Shah, A., Kumar, V., & Gantait, S. (2018). Engineered nanomaterials for plant growth and development: a perspective analysis. *Science of the Total Environment*, 630, 1413-1435.

- Wang, Z., Li, F., Liu, C., Zhou, K., Feng, W., He, S., & Liang, X. (2025). Enhanced soil aggregation and reduced colloidal phosphorus loss by straw biochars in tea and medicinal herb cropping systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 393, 109824.
- Wu, W., Zhen, Z., Yang, G., Yang, C., Song, M., Li, X., ... & Zhang, D. (2025). Straw biochar improves rice yield by regulating ammonia-oxidizing microorganisms and physicochemical properties of subtropical saline soils by a pot study. *Environmental Technology & Innovation*, 104204.
- Xin, Z., Ruan, C., Wang, J., Tong, J., Deng, Z., Zhang, H., ... & Shi, J. (2025). Nut shell biochar effectively repairs mixed pollution of heavy metal anions and PFAS in soil. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 118241.
- Yaashikaa, P. R., Kumar, P. S., Varjani, S., & Saravanan, A. J. B. R. (2020). A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. *Biotechnology reports*, 28, e00570.
- Yaman, E. (2023a). Influence of catalyst support type on silver poplar pyrolysis vapors: a Py/GC-MS study. *Journal of Porous Materials*, 30(5), 1427-1438.
- Yaman, E., Apaydın-Varol, E., Gültaş, H. T., & Özbay, N. (2019). Ceviz Kabuğunun Karbonizasyonu ile Elde Edilen Katı Ürününün Toprak Düzenleyicisi Olarak Kullanılması. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6, 106-116.
- Yaman, E., Ulu, T. C., & Özbay, N. (2023b). Characterization of different biochars and their impacts on infectivity of entomopathogenic nematode *Heterorhabditis bacteriophora*. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(11), 10177-10190.
- Yaman, E., Gökmen, F. Ö., Temel, S., & Özbay, N. (2022). Evaluation of bio-char as porous catalyst support in the pyrolysis of *Brassica napus* subsp. *napus* cake. *Journal of Porous Materials*, 29(3), 771-781.
- Ye, L., Gao, G., Li, F., Sun, Y., Yang, S., Qin, Q., ... & Sun, L. (2025). A comprehensive review on biochar-based materials for the safe utilization and remediation of heavy metal-contaminated agricultural soil and associated mechanisms. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 116179.
- Zhang, L., Hu, S., Su, J., Meng, M., Liu, K., Miao, Y., ... & Gu, Y. (2025a). Two-dimensional bismuthene doped biochar for the detection of the heavy metal ion Cd (II). *Talanta*, 128717.
- Zhang, S., Xue, L., Liu, J., Xia, L., Jia, P., Feng, Y., ... & Zhao, X. (2024). Biochar application reduced carbon footprint of maize production in the saline–alkali soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 368, 109001.

- Zhang, C., Li, Z., Miao, Y., & Liao, X. (2025). Combining effects of nitrogen fertilizer and biochar on soil N₂O emissions and microbial community in a subtropical rapeseed-soybean rotation. *European Journal of Soil Biology*, 126, 103750.
- Zhang, Z., Hou, G., Luo, X., Gao, M., Liu, Z., Wang, M., ... & Chang, X. (2025b). The Hotspots and Trends in the Literature on Soil Salinization in China: A Visualized Analysis Based on CiteSpace. *Water*, 17(5), 673.
- Zou, C. J., Shi, Z. M., Zhang, N., Zhu, Y. H., Yang, L. H., & Wang, X. Y. (2025). Synergistic effects of potassium-silicon-calcium mineral fertilizer combined with rice husk biochar on the immobilization of Cd and Pb in soil. *China Geology*, 8(2), 253-264.)



BÖLÜM 12

Güneş Kollektörlerinde Kullanılan Yutucu Yüzey Kaplama Malzemeleri

Recep Külcü¹

GİRİŞ

Güneş enerjisi yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde yüksek potansiyeli ve düşük çevresel etkileri ile ön plana çıkmaktadır. Bu nedenle fosil enerji kaynaklarının neden olduğu çevre sorunlarına çözüm arayışlarında stratejik değere sahiptir. Güneş enerjisi, elektrik üretimi ve ısı enerjisi dönüşümü alanlarında yoğun olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda küresel ısınmaya karşı fosil enerji kaynağı kullanımının azaltılması stratejileri doğrultusunda güneş enerjisinden elektrik ve ısı enerjisi üreten tesislerin sayısında büyük bir artış yaşanmaktadır. Türkiye, coğrafi konumu sayesinde yıllık yaklaşık 2.737 saat güneşlenme süresine ve 1.527 kWh/m² yıllık ortalama güneşlenme değerine sahiptir. Bu potansiyel, 26,4 milyon ton eşdeğer petrol (Tep) ısı enerjisi ve 8,8 Mtep elektrik üretimine karşılık gelmektedir (Balat, 2005). Türkiye’de güneş enerjisinden elektrik üretimi ve ısı enerjisi kullanımı son yıllarda önemli ölçüde artış göstermektedir. 2020’li yılların başında Türkiye’nin kurulu güneş fotovoltaik kapasitesi 7 GW seviyesini aşarak yıllık yaklaşık 10 TWh elektrik üretimi sağlamıştır (Kaygusuz, 2011). Bunun yanı sıra, güneş kolektörleri yaygın biçimde kullanılmakta olup, 2010’ların ortalarında toplam kurulu kolektör alanı 18 milyon m² seviyesine ulaşmıştır (Benli, 2016). Bu alanlardan elde edilen ısı enerjisi, özellikle sıcak su üretiminde değerlendirilmektedir ve yıllık yaklaşık 5 milyon TEP (ton eşdeğer petrol) seviyesinde ısı enerjisi sağlandığı hesaplanmaktadır (Hepbaslı, Ulgen, & Eke, 2004). Çalışmalar, düz plakalı kolektörlerin Türkiye’de en yaygın kullanılan sistem olduğunu ve yıllık ortalama %40–60 verimlilik aralığında çalıştığını göstermektedir (Yılmaz, 2018). Bu veriler, Türkiye’nin hem elektrik üretiminde hem de ısı enerjisi ihtiyacının karşılanmasında güneş enerjisinin giderek daha önemli bir rol üstlendiğini ortaya koymaktadır.

Güneş kolektörleri, güneş enerjisinden ısı enerjisi dönüşümü gerçekleştiren sistemlere verilen genel bir addır. Güneş kolektörleri genellikle hava veya sıvı ısıtmaya dayalı olarak tasarlanabildikleri gibi; elektrik ve ısı enerjisi veya hava ve su soğutmalı gibi hibrit sistemlerde mevcuttur. Bu çalışmada güneş enerjisinden ısı enerjisi dönüşümünde, kolektör verimi üzerinde çok etkili olan yutucu yüzey kaplamalarının teknolojilerinde değişimler değerlendirilmiş ve günümüzde

¹ Prof. Dr., Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Makineleri ve Tek. Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye, ORCID: 0000-0002-7185-6514

modern tekniklerle üretilen yutucu yüzey kaplamalarının termal özellikleri değerlendirilmiştir.

Güneş Kollektörleri

Hava ısıtmalı güneş kolektörleri, güneş radyasyonunu doğrudan havaya aktaran sistemlerdir. Yutucu yüzey, genellikle seçici kaplamalarla hazırlanır ve üzerine düşen kısa dalga boylu güneş ışınlarını ısıya dönüştürür. Üst örtü malzemesi (cam veya polimer) optik geçirgenliği yüksek olacak şekilde seçilir, böylece güneş ışınları içeri girerken kızılötesi dalga boyundaki ısının dışarı kaçışı engellenir. Kolektör haznesinde yer alan hava kanalları, elde edilen ısının doğal veya zorlanmış konveksiyon yoluyla taşınmasını sağlar. Yalıtım tabakaları, yan ve alt kısımlardan ısı kayıplarını sınırlar. Bu tip kolektörler; binaların ısıtılması, tarımsal ürünlerin kurutulması ve seraların iklimlendirilmesi gibi düşük sıcaklık gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Kalogirou, 2004).



Şekil 1. Hava ısıtmalı güneş kolektörü (Indiamart, 2025)

Su ısıtmalı güneş kolektörlerinde ısının taşıyıcı ortamı sudur. Yutucu yüzeyde tutulan radyasyon enerjisi, yüzeyin altında bulunan bakır veya alüminyum borulara iletilir. Boruların içerisinden geçen su konvektif ısı transferi ile ısınır ve bir depolama tankına gönderilir. Üst örtü malzemesi, optik geçirgenliği artırırken ısı kayıpları düşürmek için optimize edilir. Yalıtım tabakaları, iletimle oluşacak enerji kayıplarını azaltır. Bu sistemler özellikle konutlarda sıcak su üretimi, merkezi ısıtma sistemleri, yüzme havuzu ısıtması ve endüstriyel proseslerde tercih edilmektedir (Kumar & Rosen, 2011).



Şekil 2. Su ısıtmalı güneş kollektörü (Climacento, 2025)

Hava-su hibrit kollektörleri, aynı yutucu yüzeyden hem hava hem de suya ısı transferi sağlayarak iki akışkanlı kullanım imkânı sunar. Kolektör tasarımında yutucu yüzeyin arkasına hem boru devresi hem de hava kanalları entegre edilmiştir. Üst örtü malzemesi optik verimliliği artırırken, yalıtım tabakaları kayıpları en aza indirir. Böylece tek bir sistem, sıcak su ihtiyacının yanında bina ısıtma veya havalandırma amaçlı sıcak hava üretimi de yapabilir. Bu esneklik sayesinde özellikle oteller, spor kompleksleri ve sanayi tesislerinde tercih edilmektedir (Shemelin & Matuska, 2019; Arslan et al., 2020).

Elektrik ve ısı enerjisi hibrit kollektörleri (fotovoltaik/termal–PV/T sistemler) ise aynı modül üzerinden hem elektrik hem de ısı enerjisi üretir. PV hücreler güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürürken, hücrelerde biriken ısı enerjisi ise arka kısımdaki ısı değiştiriciler aracılığıyla hava veya suya aktarılır. Bu tasarım, fotovoltaik panellerde oluşan aşırı sıcaklıkları düşürerek elektrik üretim verimini artırır ve eş zamanlı olarak kullanılabilir ısı enerjisi sağlar. PV/T sistemler, özellikle binalarda elektrik ve sıcak su ihtiyacını aynı anda karşılamak, endüstriyel tesislerde ise elektrik ve düşük-orta sıcaklıkta ısı enerjisi talebini sağlamak için uygulanmaktadır (Tyagi et al., 2012; Hussain et al., 2013). Bu tip hibrit kollektörler, sürdürülebilir enerji teknolojileri arasında yüksek verimlilikleriyle öne çıkmaktadır.

Güneş kollektörlerinde; kollektör tasarımı, geometrisi, yutucu yüzey malzemesi, kullanılan yalıtım malzemesinin kalınlığı ve türü ile cam örtünün özellikleri kollektör verimini doğrudan etkilemektedir. Ancak yutucu yüzey malzemesi, güneş radyasyonunu termal enerjiye dönüştüren yüzey olması nedeniyle verim üzerindeki etkisi diğer faktörlerden daha yüksektir. Yutucu yüzey malzemelerinin yutma ve yayma katsayıları, termal dönüşümü doğrudan

etkilemektedir. Siyah yüzey malzemelerinde genellikle yutma katsayıları oldukça yüksektir. Fakat yayma katsayısı, düşük teknolojiye kaplama malzemelerinde verimi azaltacak şekilde yüksek olmaktadır. Bu nedenle yayma katsayısı düşürülmüş seçici yüzey kaplama malzemeleri geliştirilerek termal dönüşüm verimi arttırılmaya çalışılmaktadır. Bu çalışmada kollektör verimlerini arttırmak amacıyla geliştirilmiş yutucu yüzey malzemelerinin termal özellikleri değerlendirilmiştir.

Yutucu Yüzey Malzemeleri

Yutucu yüzey malzemesi olarak kullanılan en basit malzeme is siyahı veya mat siyah boyalardır. Bu yüzey kaplamalarının yutma katsayıları makul düzeydeyken, yayma katsayıları oldukça yüksek seviyededir. Yayma katsayısının yüksek olması termal verimi olumsuz etkilemektedir. Bu sorunu gidermek amacıyla farklı teknolojiler kullanılarak seçici yüzey kaplamaları geliştirilmektedir. Tablo 1’de yer alan mat siyah boya haricindeki kaplamalar, seçici yüzey kaplamaları olarak değerlendirilmektedir.

Tablo 1. Günümüzde kullanılan yutucu yüzey kaplama malzemelerinin özellikleri

Yüzey Kaplama Malzemesi	Yutma Katsayısı (α)	Yayma Katsayısı (ϵ)	Nanoyapı / Yapısal Özellikler	Üretim / Kaplama Yöntemi	Kaynak
Mat siyah boya	0.85–0.95	0.80–0.95	Pigment + polimer bağlayıcı; IR’de yüksek yayım	Fırınlama / boya kaplama	(Tuğral, 2010)
Bakır oksit (CuO)	0.90–0.95	0.10–0.20	Nano kristal oksit film	Sol-jel, kimyasal banyo	(Amri et al., 2014)
Kobalt oksit (Co ₃ O ₄ /CoO)	0.90–0.95	0.08–0.15	Oksit film; tane boyutu ile ayarlanabilir	Sol-jel, sprej	(Amri et al., 2014)
Spinel CuMnO _x	0.93–0.96	0.06–0.12	Spinel nanopartiküller; AR tabaka ile verim artışı	Sol-jel, daldırma	(Amri et al., 2014)
Spinel Cu–Co–MnO _x	0.83–0.95	0.06–0.12	Çoklu katman; yüksek aşınma direnci	Sol-jel, çok katman sprej	(Amri et al., 2014)
Siyah krom (Cr–Ni tabanlı)	0.92–0.96	0.05–0.08	Mikro/nano gözenekli krom + oksit fazı	Elektrodepozisyon + ısıtma oksidasyon	(Pettit et al., 1982)
Ni–NiO _x seramik-metal kompozit (cermet)	≈0.96	≈0.10	Gradyan metal hacim oranı; nanoyapılı	Magnetron sputter	(Kennedy, 2002)
Cr/Cr _x O _y /Cr ₂ O ₃ çok katman	0.90–0.96	0.05–0.10	İnce film girişim etkisi	Pulsed DC sputter (PVD)	(Barshilia & Nagarajan, 2008)
Ni–Al ₂ O ₃ seramik-metal kompozit (cermet)	0.94–0.98	0.05–0.10	5–50 nm metal nanoparçacıklar	PVD, reaktif sputter	(Cao et al., 2014)
W–Al ₂ O ₃ seramik-metal kompozit (cermet)	0.95–0.98	≤0.10	W tabaka + dielektrik matris	DC / magnetron sputter	(Cao et al., 2015)
WTi–Al ₂ O ₃ cermet	~0.93	~0.10	WTi nanotaneler, yüksek T stabilitesi	Reaktif sputter	(Wang et al., 2017)
Zr–O seramik-metal kompozit (cermet)	0.94–0.96	0.07–0.10	Çift katmanlı cermet + AR tabakası	DC magnetron sputter	(Lee, 2006)
MC _x O _y N _z (karbür/silisitletme)	0.84–0.93	0.02–0.06	Refrakter karbür/nitrür;	PVD / CVD çok katman	(Kennedy, 2002)

			multilayer selektivite			
Refrakter metaller (W, Mo, HfC, ZrB₂)	0.90– 0.96	0.05– 0.10	Yüksek sıcaklık kararlılığı	PVD, yüzey tekstürleme	CVD,	(Kennedy, 2002; Platzer & Hildebrand t, 2012)
AlCrO korumalı dokulu çelik	0.86– 0.92	0.15– 0.17	AlCr oksit tabaka + yüzey dokusu	İyon aşındırma + RF sputter		(Pelenovic h et al., 2021)
Spinel Cu–Mn– Cr nanopigment	>0.94 (750 °C)	düşük	Nanopigment kaplama, yüksek T dayanımı	Sprey kaplama nanopartikül		(Xu et al., 2023)
TiNOX® (ticari, Almeco/Alanod)	≈0.95	0.04– 0.06 (200 °C)	Nano-yapılı çok katmanlı selektif yüzey	Endüstriyel PVD / sputter		(Almeco, 2024)

Siyah Boya Kaplamalar

Siyah boya yüzeyler, güneş enerjisi sistemlerinde kullanılan en basit yutucu kaplamalardır. Genellikle organik pigmentler ve polimer bağlayıcılarla uygulanır. Ucuz ve kolay uygulanabilir olmaları avantajdır, ancak yayma katsayılarının çok yüksek ($\epsilon \approx 0.80\text{--}0.95$) olması sebebiyle kızılötesi bölgede ciddi ısı kaybına neden olurlar. Ayrıca uzun süreli kullanımda UV ışınlarına ve dış ortam koşullarına karşı düşük dayanım gösterirler (Tuğral, 2010).

Bakır Oksit (CuO)

Bakır oksit kaplamalar sol-jel ve kimyasal banyo yöntemleriyle elde edilen nanokristal filmlerdir. Yutma katsayısı değerleri 0.90–0.95 aralığında yüksek, emisivite (yayma katsayısı) değerleri ise orta seviyededir ($\epsilon = 0.10\text{--}0.20$). Düşük maliyetli olmaları nedeniyle yaygın kullanılırlar. Ancak yüksek sıcaklıklarda oksit faz değişimleri ve morfolojik bozulmalar nedeniyle optik kararlılıkları sınırlıdır (Amri et al., 2014).

Kobalt Oksit (Co₃O₄/CoO)

Kobalt oksit tabanlı yüzeyler, yüksek yutma ($\alpha \approx 0.90\text{--}0.95$) ve düşük emisivite ($\epsilon \approx 0.08\text{--}0.15$) değerleriyle dikkat çeker. Sol-jel veya spre y kaplama teknikleri ile üretilirler. Kobalt oksit kaplamaların en önemli avantajı kimyasal kararlılıkları ve oksidasyona karşı dirençleridir. Bu özellikleri nedeniyle uzun ömürlü düz toplayıcılarda tercih edilir (Amri et al., 2014).

Spinel Kaplamalar (CuMnO_x , Cu-Co-MnO_x)

Spinel yapılar, metal oksitlerin karışımlarından elde edilen kristal yapılardır. CuMnO_x spinelleri $\alpha \approx 0.93\text{--}0.96$, $\varepsilon \approx 0.06\text{--}0.12$ değerleriyle yüksek seçicilik gösterir. Çok katmanlı daldırma ve sol-jel yöntemleri ile üretilebilir. Cu-Co-MnO_x spinelleri ise daha iyi aşınma direnci sağlar ve dış ortamlarda uzun süreli kullanım için uygundur (Amri et al., 2014).

Siyah Krom Kaplamalar

Siyah krom, 1950'lerden itibaren geliştirilen en yaygın seçici yüzeylerden biridir. Elektrodepozisyon yöntemi ile metal yüzeylere krom kaplanır ve ısıtılarak oksidasyonla Cr_2O_3 fazı elde edilir. Mikro/nano gözenekli yapısı sayesinde $\alpha = 0.92\text{--}0.96$ ve $\varepsilon = 0.05\text{--}0.08$ değerleri sağlanır. Yüksek sıcaklıklarda termal kararlılığı oldukça iyidir. En önemli dezavantajı, üretim sürecinde kullanılan Cr^{6+} bileşiklerinin çevresel açıdan zararlı olmasıdır (Pettit et al., 1982).

Ni-NiO_x Seramik-Metal Kompozit (Cermet)

Ni-NiO_x cermetleri, metal (Ni) ve oksit (NiO_x) fazlarının gradyanlı dağılımına sahip çok katmanlı yapılardır. Bu yapı sayesinde güneş spektrumunda yüksek absorpsiyon ($\alpha \approx 0.96$) sağlanırken, kızılötesi bölgede düşük yayım ($\varepsilon \approx 0.10$) korunur. Endüstride Sunstrip adıyla bilinen ticari ürünler bu teknolojiye dayanmaktadır. Magnetron sputter yöntemiyle üretilir (Kennedy, 2002).

Cr/Cr_xO_y/Cr₂O₃ Çok Katmanlı Yapılar

Çok katmanlı krom oksit yapıları, ince film girişim etkisi ile optik seçiciliği artırır. Tipik olarak $\alpha = 0.90\text{--}0.96$, $\varepsilon = 0.05\text{--}0.10$ değerleri elde edilir. Pulsed DC sputter gibi PVD yöntemleriyle üretim yapılır. Katman kalınlıklarının nanometre ölçeğinde hassas ayarlanması optik performans için kritik öneme sahiptir (Barshilia & Nagarajan, 2008).

Ni-Al₂O₃ Seramik-Metal Kompozit (Cermet)

Ni nanoparçacıkları (5–50 nm boyutlarında) Al₂O₃ dielektrik matris içinde dağıtılarak oluşturulur. Bu yapı, $\alpha \approx 0.94\text{--}0.98$, $\varepsilon \approx 0.05\text{--}0.10$ değerlerini sağlar. Reaktif sputter veya PVD yöntemleriyle üretilir. Yüksek seçicilik ve orta sıcaklıklarda kararlılıklarıyla düz toplayıcı uygulamalarında yaygın kullanılır (Cao et al., 2014).

W-Al₂O₃ Seramik-Metal Kompozit (Cermet)

Tungsten tabanlı cermetler, yüksek sıcaklıklarda oksidasyona karşı dayanıklıdır. $\alpha \approx 0.95\text{--}0.98$, $\varepsilon \leq 0.10$ değerleriyle özellikle yoğunlaştırılmış güneş enerjisi (CSP) uygulamaları için uygundur. Magnetron sputter yöntemi ile üretilir. 600 °C'ye kadar termal stabilite rapor edilmiştir (Cao et al., 2015).

WTi–Al₂O₃ Cermet

WTi alaşımlı nanoparçacıkların Al₂O₃ matris içinde dağıtılmasıyla elde edilir. Bu sayede yüksek sıcaklıklarda düşük emisivite korunur. Yaklaşık $\alpha = 0.93$, $\varepsilon = 0.10$ değerleriyle CSP sistemlerinde tercih edilir. Reaktif sputter yöntemi ile üretimi yapılır (Wang et al., 2017).

Zr–O Seramik-Metal Kompozit (Cermet)

Zirkonyum tabanlı seramik-metal kompozitlerde $\alpha \approx 0.94$ – 0.96 , $\varepsilon \approx 0.07$ – 0.10 değerleri elde edilmiştir. Çift katmanlı yapılar AR tabaka ile desteklenerek optik performans artırılır. DC magnetron sputter yöntemiyle üretilir (Lee, 2006).

Refrakter Karbür/Nitrür Kaplamalar (MC_xO_yN_z)

SiC, ZrC ve TiN gibi refrakter bileşiklerden oluşur. Çok düşük emisivite değerleri ($\varepsilon = 0.02$ – 0.06) nedeniyle kızılötesi kayıpları minimize ederler. Ancak yutma katsayısı değerleri orta seviyededir ($\alpha = 0.84$ – 0.93). PVD veya CVD yöntemleri ile multilayer yapılar halinde üretilir (Kennedy, 2002).

Refrakter Metaller ve Seramikler

W, Mo, HfC ve ZrB₂ gibi malzemeler yüksek sıcaklık uygulamalarına uygun olup 500 °C üzerinde bile kararlıdır. $\alpha = 0.90$ – 0.96 , $\varepsilon = 0.05$ – 0.10 değerleriyle CSP sistemlerinde tercih edilirler. PVD ve CVD kaplama teknikleriyle üretilebilirler (Kennedy, 2002; Platzer & Hildebrandt, 2012).

AlCrO Korumalı Dokulu Çelik

Çelik yüzeylere AlCr oksit tabakası uygulanarak oksidasyon direnci artırılır. Yüzeyin iyon aşındırma ile dokulandırılması, ışığın hapsedilmesini kolaylaştırarak absorptansı artırır. $\alpha = 0.86$ – 0.92 , $\varepsilon \approx 0.15$ – 0.17 değerleri elde edilmiştir. RF magnetron sputter yöntemi ile üretilir (Pelenovich et al., 2021).

Spinel Cu–Mn–Cr Nanopigment Kaplamalar

Sprey kaplama yöntemiyle yüzeye uygulanan Cu–Mn–Cr spinel nanopigmentleri, 750 °C'ye kadar yüksek termal stabilite göstermiştir. Bu kaplamalar $\alpha > 0.94$ değerini koruyarak yüksek sıcaklık dayanımı sağlar. Özellikle konsantre güneş sistemleri için uygundur (Xu et al., 2023).

TiNOX® Ticari Yüzey

TiNOX®, Almeco/Alanod tarafından üretilen ticari selektif kaplamadır. Nano-yapılı çok katmanlı PVD teknolojisi ile üretilir. Üst tabaka anti-refle görevi görürken, alt tabaka yüksek IR yansıtıcı olarak çalışır. $\alpha \approx 0.95$, $\varepsilon \approx 0.04$ – 0.06 değerleri ile düz toplayıcı uygulamalarında yaygın kullanılır (Almeco, 2024).

SONUÇ

Güneş enerjisinin küresel ölçekte yaygınlaşması, kollektör performansını belirleyen en kritik unsurlardan biri olan yüzey kaplamalarının önemini ön plana çıkarmıştır. Seçici yüzey kaplamaları, yüksek soğurma katsayısı ve düşük kızılötesi yayma oranı sayesinde güneş ışınımını etkin biçimde ısıya dönüştürerek kayıpları minimize eder. Son yıllarda geliştirilen seramik-metal (cermet) yapılar, nanoölçekli tabaka teknolojileri ve ince film kaplama yöntemleri hem yüksek sıcaklık dayanımı hem de uzun süreli kararlılık sağlaması bakımından öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, seçici yüzeylerin maliyetleri üretim yöntemi ve kullanılan malzeme türüne göre değişmekte olup, sürekli üretim teknikleri sayesinde ekonomik açıdan daha erişilebilir hale gelmektedir. Kaplamaların yaşlanma süreçleri ve çevresel etkilere karşı dayanıklılıkları, uzun vadeli enerji maliyetlerini doğrudan etkilemekte ve bu nedenle kaplama teknolojilerinin sürdürülebilirliği stratejik bir öneme sahiptir. Genel olarak değerlendirildiğinde, seçici yüzey kaplamalarının başarısı yalnızca verimlilik artışıyla değil, aynı zamanda düşük maliyet, uzun ömürlülük ve seri üretime uygunluk kriterleriyle ölçülmekte; bu bağlamda yeni nesil nanoteknolojik çözümler güneş enerjisi kollektörlerinde geleceğin standardı olarak görülmektedir.

Güneş kollektörlerinde kullanılacak yutucu yüzey kaplama malzemesinin seçiminde verimlilik ve maliyet mutlaka birlikte değerlendirilmelidir. Bu doğrultuda mutlaka hesaplama dayalı simülasyonların gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Örneğin Antalya gibi yüksek radyasyon alan illerde konutlar için sıcak su üreten bir sistemde seçici yüzey kaplaması gereksiz bir maliyet yükü oluşturabilir fakat güneşlenme süresi ve günlük güneş radyasyonu miktarının daha düşük olduğu bir bölge için seçici olamayan yutucu yüzey kaplamaları ciddi verim düşüşlerine neden olarak sistemlerin efektif kullanımını engelleyebilir. Bu çalışmada literatürden derlenen seçici yüzey kaplamalarının termal özellikleri kullanılarak uygulama yapılacak coğrafi konumlarda teorik hesaplamaların yapılması için veri oluşturulması sağlanmıştır.

KAYNAKLAR

- Almeco Group. (2024). TiNOX energy—Technical specification (V9). Almeco/Alanod.
- Amri, A., Jiang, Z. T., Pryor, T., Yin, C.-Y., & Djordjevic, S. (2014). Developments in the synthesis of flat plate solar selective absorber materials via sol–gel methods: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 316–328. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.062>
- Arslan, E., Tuncer, A. D., Koşan, M., Aktaş, M., & Dolgun, E. C. (2020). Designing of a new type air-water cooled photovoltaic collector. *Tehnički glasnik*, 14(1), 27–34. <https://hrcak.srce.hr/clanak/342817>
- Balat, H. (2005). Solar energy potential in Turkey. *Energy Sources*, 23(1), 61–72. <https://doi.org/10.1260/0144-5987.23.1.61>
- Barshilia, H. C., & Nagarajan, S. (2008). Structure and optical properties of pulsed sputter deposited CrxOy/Cr/Cr2O3 multilayer absorber coatings. *Journal of Applied Physics*, 103(2), 023507. <https://doi.org/10.1063/1.2831364>
- Benli, H. (2016). Potential application of solar water heaters for hot water production in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 99–109. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211501031X>
- Cao, F., Kraemer, D., Sun, T., Lan, Y., & Ren, Z. (2015). Enhanced thermal stability of W–Ni–Al₂O₃ cermet-based spectrally selective solar absorbers. *Advanced Energy Materials*, 5(8), 1401042. <https://doi.org/10.1002/aenm.201401042>
- Cao, F., McEnaney, K., Chen, G., & Ren, Z. (2014). A review of cermet-based spectrally selective solar absorbers. *Energy & Environmental Science*, 7(5), 1615–1637. <https://doi.org/10.1039/c3ee43825b>
- Climacento, 2025. <https://www.climacento.co.ke/climacento-online-shop/flat-panel-solar-water-heater-200-lts-compact-system>
- Hepbasli, A., Ulgen, K., & Eke, R. (2004). Solar energy applications in Turkey. *Energy Sources*, 26(12), 1139–1151. <https://doi.org/10.1080/00908310490438579>
- Hussain, F., Othman, M. Y. H., Sopian, K., & Yatim, B. (2013). Design development and performance evaluation of photovoltaic/thermal (PV/T) air base solar collector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 289–297. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113002657>
- Indiamart, 2025. <https://www.indiamart.com/proddetail/solar-air-heater-7878781788.html>. Erişim Ta rihi: 11/08/2025.

- Kalogirou, S. A. (2004). Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(3), 231–295. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128504000103>
- Kaygusuz, K. (2011). Prospect of concentrating solar power in Turkey: The sustainable future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 808–814. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110003291>
- Kennedy, C. E. (2002). Review of mid- to high-temperature solar selective absorber materials (NREL/TP-520-31267). National Renewable Energy Laboratory.
- Kumar, R., & Rosen, M. A. (2011). A critical review of photovoltaic–thermal solar collectors for air heating. *Applied Energy*, 88(11), 3603–3614. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261911002790>
- Lee, S. H. (2006). Optical properties of Zr–ZrO₂ cermet selective absorbers. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(10), 1391–1402. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2005.08.001>
- Pelenovich, V. O., et al. (2021). Protective AlCrO coatings on textured steels for solar absorbers. *Surface and Coatings Technology*, 405, 126578. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126578>
- Pettit, R. B., Koenig, J. F., & Alvis, R. L. (1982). Black chrome solar selective coatings optimized for high-temperature service. *Solar Energy Materials*, 7(3), 311–322. [https://doi.org/10.1016/0165-1633\(82\)90081-8](https://doi.org/10.1016/0165-1633(82)90081-8)
- Platzer, W., & Hildebrandt, C. (2012). Absorber materials for solar thermal receivers in CSP systems. In K. Lovegrove & W. Stein (Eds.), *Concentrating solar power technology* (pp. 469–498). Woodhead Publishing.
- Shemelin, V., & Matuska, T. (2019). Performance modelling of dual air/water collector in solar water and space heating application. *International Journal of Photoenergy*, 2019, 1–12. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1155/2019/8560193>
- Tuğral, A. (2010). Güneş enerjili su ısıtma sistemlerinde düz toplayıcı verim faktörünün simülasyonla incelenmesi [Yüksek lisans tezi, İnönü Üniversitesi].
- Tyagi, V. V., Kaushik, S. C., & Tyagi, S. K. (2012). Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1383–1398. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111006058>
- Wang, X., Chen, Z., Zhang, Q., & Luo, H. (2017). High-temperature tolerance in WTi–Al₂O₃ cermet-based absorbing coatings. *Nano Energy*, 41, 706–713. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.09.016>

- Xu, Y., et al. (2023). High-temperature stable Cu–Mn–Cr spinel nanopigment coatings for solar absorbers. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 249, 112048. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.112048>
- Yılmaz, İ. H. (2018). Residential use of solar water heating in Turkey: A novel thermo-economic optimization for energy savings, cost benefit and ecology. *Journal of Cleaner Production*, 196, 492–502. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618327744>



BÖLÜM 13

Güneş Takip Sistemleri

Recep Külçü¹

GİRİŞ

Güneş enerjisi, küresel ölçekte enerji dönüşümünün merkezinde yer almakta olup, hem yüksek potansiyeli hem de düşük çevresel etkileri nedeniyle fosil yakıtlara sürdürülebilir bir alternatif sunmaktadır. Dünya genelinde yıllık güneş enerjisi potansiyeli 120.000 TWh civarında hesaplanmakta olup, bu değer mevcut küresel enerji tüketiminin yaklaşık 20 katına karşılık gelmektedir (Kaygusuz & Sarı, 2003). Uluslararası Enerji Ajansı verilerine göre, güneş fotovoltaik (PV) kapasitesi son on yılda %30'un üzerinde yıllık büyüme göstermiş ve 2022 itibariyle 1 TW kurulu güç seviyesini aşmıştır. Bu durum, güneş enerjisinin yalnızca elektrik üretiminde değil, aynı zamanda ısı enerjisi uygulamalarında da giderek daha stratejik bir rol üstlendiğini göstermektedir.

Türkiye, coğrafi konumu sayesinde güneş enerjisi açısından oldukça avantajlıdır. Yıllık ortalama 2.640 saat güneşlenme süresine ve yaklaşık 1.527 kWh/m² yıllık ortalama global güneş radyasyonu değerine sahiptir (Sözen et al., 2005). Bu potansiyel, yıllık yaklaşık 380 milyar kWh elektrik üretimine karşılık gelmektedir. Türkiye'nin teorik güneş enerjisi potansiyeli Avrupa ülkeleri arasında en yüksek seviyelerden birini oluşturmada, ülkenin yenilenebilir enerji stratejilerinde kritik bir yer tutmaktadır (Ozgur, 2008).

Son yıllarda Türkiye'de kurulu güneş PV kapasitesi hızla artmış ve 2020'lerin başında 7 GW seviyesini aşarak yıllık yaklaşık 10 TWh elektrik üretimi sağlamıştır (Yanıktepe et al., 2017). Bunun yanında, özellikle konutlarda sıcak su üretiminde kullanılan düz plakalı ve vakum tüplü kolektörler sayesinde yıllık 5 milyon TEP düzeyinde ısı enerjisi sağlanmaktadır (Evrendilek & Ertekin, 2003). Türkiye'nin "2023 Vizyonu" kapsamında elektrik ihtiyacının %30'unun yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması hedeflenmiş ve bu çerçevede güneş enerjisine büyük önem verilmiştir (Melikoglu, 2017).

Güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında sürdürülebilirliği, çevresel etkilerinin düşük olması ve teknik olarak geniş bir uygulama alanına sahip olması nedeniyle günümüzde en önemli enerji türlerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Güneşten elde edilen enerji, doğrudan ısı enerjisiye, elektrik enerjisine veya her ikisinin bir kombinasyonuna dönüştürülebilmektedir.

¹ Prof. Dr., Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Makineleri ve Tek. Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye, ORCID: 0000-0002-7185-6514

Bu dönüşüm yöntemleri, teknolojik çeşitliliği ve kullanım alanlarıyla enerji dönüşümünde stratejik bir rol üstlenmektedir.

Isıl enerjiye dayalı kullanım, güneş enerjisinin en eski ve en yaygın yöntemlerinden biridir. Düz plakalı veya vakum tüplü kolektörler aracılığıyla güneşten gelen radyasyon doğrudan ısıya dönüştürülür. Bu enerji, konutlarda ve endüstriyel tesislerde sıcak su üretimi, merkezi ısıtma sistemleri, tarımsal ürünlerin kurutulması ve sera iklimlendirmesi gibi alanlarda kullanılmaktadır (Kalogirou, 2004). Daha yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda ise yoğunlaştırıcı güneş enerjisi sistemleri (Concentrated Solar Power, CSP) kullanılmakta, yansıtıcı yüzeylerle toplanan enerji buhar türbinlerini çalıştırarak elektrik ve proses ısısı sağlamaktadır (Kaygusuz, 2002).

Elektrik üretiminde ise en önemli yöntem fotovoltaik (PV) sistemlerdir. PV hücreler, yarı iletken malzemeler aracılığıyla güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Bu sistemlerin modüler yapısı, hem küçük ölçekli evsel uygulamalardan büyük ölçekli güneş tarlalarına kadar geniş bir yelpazede kullanım imkânı sunmaktadır. Ayrıca hareketli parça içermemeleri bakım kolaylığı sağlamakta ve uzun ömürlü performanslarıyla yatırım açısından cazip hale gelmektedir (Green et al., 2015).

Hibrit sistemler, elektrik ve ısı enerjisiyi aynı anda üretme potansiyeliyle öne çıkmaktadır. Fotovoltaik/termal (PV/T) kolektörlerde, PV hücrelerde oluşan fazla ısının arka yüzeyden bir akışkana aktarılması sayesinde hem hücre sıcaklığı düşürülerek elektrik üretim verimi artırılmakta hem de kullanılabilir ısı enerji elde edilmektedir. Bu yönüyle PV/T sistemler, özellikle binalarda ve sanayi tesislerinde entegre çözümler sunmaktadır (Tyagi et al., 2012).

Bunun yanı sıra, pasif ve aktif kullanım yöntemleri de güneş enerjisinden yararlanmada kritik öneme sahiptir. Pasif yöntemler, binaların yönelimi, pencere yüzeylerinin optimizasyonu, ısı depolama duvarları ve doğal havalandırma sistemleri gibi mimari çözümlerle güneş enerjisinin doğrudan kullanılmasını sağlar. Aktif yöntemler ise pompalar, fanlar ve elektronik kontrol sistemleri yardımıyla enerji akışını yönlendirir ve verimliliği artırır (Sukhatme & Nayak, 2017).

Son yıllarda özellikle fotovoltaik teknolojilerde verimliliği artırmaya yönelik çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Bu araştırmalar, yeni nesil yarı iletken malzemelerin geliştirilmesine (örneğin perovskit ve tandem hücreler), ışık soğurulmasını artıran nano-yapılı yüzey kaplamalarına, ayrıca çatılara ve bina cephelerine entegre edilebilen (BIPV) çözümlere odaklanmıştır. Bu gelişmeler, PV sistemlerin hem enerji üretim kapasitelerini artırmakta hem de şehir içi alanlarda estetik ve fonksiyonel çözümler sunmaktadır (Polman et al., 2016).

Bunların yanında, güneş takip sistemleri de enerji verimliliğini artıran bir diğer kritik teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Sabit açılı paneller yalnızca belirli saatlerde optimum ışınlamı alabilirken, güneş takip sistemleri panellerin gün boyunca güneşe dik açıyla yönelmesini sağlar. Tek eksenli sistemler genellikle doğu-batı yönünde günlük hareketi takip ederken, çift eksenli sistemler hem günlük hem de mevsimsel açı değişimlerini dikkate alarak daha yüksek hassasiyet sağlar. Yapılan araştırmalar, güneş takip sistemlerinin sabit sistemlere kıyasla %15–40 arasında daha fazla elektrik üretimi sağladığını göstermektedir (Gupta et al., 2014). Ayrıca bu sistemler, özellikle geniş ölçekli güneş enerjisi santrallerinde yatırım geri dönüş sürelerini kısaltmakta ve enerji üretim güvenilirliğini artırmaktadır.

Güneş Takip Sistemi Kullanımının Sağladığı Enerji Artışı

Güneş takip sistemlerinin sabit sistemlere göre sağladığı enerji artışı üzerine yapılan araştırmalar oldukça geniştir ve farklı coğrafi koşullarda birbirini tamamlayıcı sonuçlar vermektedir.

Sawicka-Chudy ve Sibiński (2018) Polonya’da yaptıkları deneysel çalışmada, takip sistemlerinin sabit sistemlere kıyasla yıllık enerji üretiminde yaklaşık %18 artış sağladığını bildirmiştir (Sawicka-Chudy & Sibiński, 2018). Benzer şekilde, Chandel ve Chandel (2022) Hindistan’da 19 MWp büyüklüğünde ticari bir santralde yaptıkları analizde, sabit ve ayarlanabilir eğimli sistemlere kıyasla takipli sistemlerin %25’e varan ek enerji ürettiğini ortaya koymuştur (Chandel & Chandel, 2022).

Drury, Lopez ve Denholm (2014) ABD’de farklı iklim koşullarında gerçekleştirdikleri karşılaştırmalarda, tek eksenli güneş takip sistemlerinin sabit sistemlere göre ortalama %20–25 daha fazla enerji ürettiğini göstermiştir (Drury et al., 2014). Hammad et al. (2017) ise Ürdün’de sabit ve çift eksenli sistemleri ekonomik açıdan karşılaştırarak, çift eksenli sistemlerin %30’a varan üretim artışı sağladığını, ancak ilk yatırım maliyetlerinin geri ödeme süresini belirgin biçimde etkilediğini rapor etmiştir (Hammad et al., 2017).

En güncel araştırmalardan biri olan Eiva et al. (2025), çift eksenli sistemlerin şebeke entegrasyonunda daha istikrarlı enerji üretimi sağladığını ve sabit sistemlere göre %35’e kadar enerji artışı sunduğunu göstermektedir (Eiva et al., 2025). Kuzey Afrika’da yapılan çalışmada, Koussa et al. (2011) farklı takip sistemlerini modellemiş ve sabit sistemlere kıyasla tek eksenli sistemlerde %25, çift eksenli sistemlerde ise %40’a varan verimlilik artışı raporlamıştır (Koussa et al., 2011).

Türkiye’de yapılan analizlerde, Eke ve Şentürk (2012), çift eksenli takip sistemlerinin sabit sistemlere göre %32 daha fazla elektrik ürettiğini belirtmiştir (Eke & Şentürk, 2012). Daha yakın tarihte, Gönül et al. (2022) manuel ayarlı ve

otomatik takipli sistemleri karşılaştırmış ve otomatik takip sistemlerinin %22–27 ek enerji sağladığını, ayrıca yatırım geri dönüş süresini kısalttığını ortaya koymuştur (Gönül et al., 2022).

Ayrıca, Gómez-Gil, Wang ve Barnett (2012) sabit, takipli ve yoğunlaştırıcı PV sistemlerini analiz ederek, tek eksenli takip sistemlerinde %15–25, çift eksenli sistemlerde ise %30–40 arasında ek enerji sağlandığını raporlamıştır (Gómez-Gil et al., 2012). Kelly ve Gibson (2009) ise özellikle bulutlu hava koşullarında bile takip sistemlerinin sabit sistemlere kıyasla %30–50 arasında daha fazla enerji üretebildiğini göstermiştir (Kelly & Gibson, 2009).

Genel olarak bu çalışmalar, coğrafi koşullar ve sistem türlerine bağlı olarak değişmekle birlikte güneş takip sistemlerinin sabit sistemlere göre %15 ila %40 arasında enerji artışı sağladığını, bazı özel koşullarda bu oranın daha yüksek seviyelere çıkabildiğini göstermektedir.

Güneş Takip sistemleri

Güneş takip sistemlerinin temel hedefi, güneş paneline gelen güneş ışınımının açısının daima dik veya geliş açısı sıfır olacak şekilde panelin güneşi takip etmesini sağlamaktır. Bu bağlamda güneş takip sistemleri farklı özelliklerde ve takip mekanizmalarında üretilmektedirler. Her sistemin yapısal özelliklerine bağlı olarak avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

1. Pasif Takip Sistemleri

Pasif takip sistemleri, mekanik hareketi herhangi bir harici enerji kaynağı olmadan gerçekleştiren sistemlerdir. Temel prensipleri, sıvı veya gazların ısıl genişlemesinden yararlanmaktır. Bu sistemlerde genellikle iki tarafı siyah boyalı, saydam tüpler veya hazneler bulunur. Güneş ışığı bir tarafı daha fazla ısıttığında o kısımdaki sıvı veya gaz genişler ve basınç farkı oluşturur. Bu basınç farkı mekanik bir kol ya da piston aracılığıyla panelin eğilmesini sağlar. Panel, ışığın daha yoğun olduğu yöne doğru döner. Böylece sistem herhangi bir elektronik sensör veya motor olmadan güneşi izler (Mousazadeh et al., 2009).

- **Avantajları:** Enerji tüketmez, düşük maliyetlidir, mekanik olarak basittir.
- **Dezavantajları:** Güneşin ani hareketlerini (ör. bulut geçişleri) algılayamaz, doğruluk sınırlıdır, sıcaklık farklılıklarına bağımlıdır.
- **Uygulama Alanları:** Küçük ölçekli paneller, düşük maliyetli tarımsal sulama sistemleri.

2. Aktif Takip Sistemleri

Aktif sistemlerde hareket, elektrik motorları ve aktüatörler ile sağlanır. Bu motorlar, kontrol ünitesinden (mikrodenetleyici, PLC vb.) gelen sinyallere göre panelleri hareket ettirir. İki temel alt tür vardır:

a) Tek Eksenli Sistemler

Paneller, doğu–batı doğrultusunda bir eksen etrafında döner. Gün doğumundan batımına kadar güneşi takip eder. Çalışma prensibi şu şekildedir:

1. **Sensör tabanlı sistemlerde** LDR veya fotodiyotlar, ışık yoğunluğunu algılar. Eğer bir sensör diğerinden daha fazla ışık algılırsa, kontrol ünitesi motoru o yöne doğru hareket ettirir.
2. **Astronomik tabanlı sistemlerde** motorlar, önceden yüklenmiş güneş konum algoritmalarına göre belirli zaman aralıklarında hareket eder.

Enerji artışı sabit sistemlere kıyasla %15–25 seviyesindedir (Racharla & Rajan, 2017).

- **Avantajları:** Düşük ek maliyet, geniş alanlarda verimli kullanım.
- **Dezavantajları:** Kuzey–güney yönlü açı değişimini takip edemez, verim artışı sınırlıdır.

b) Çift Eksenli Sistemler

Paneller hem doğu–batı hem de kuzey–güney ekseninde hareket eder. Güneşin gün içi ve yıl boyu tüm açısai değişimlerini takip edebilir.

- **Çalışma Prensibi:**
 - İki adet motor veya lineer aktüatör bulunur.
 - Birincisi paneli yatay düzlemde doğu–batı yönünde hareket ettirir.
 - İkincisi dikey düzlemde kuzey–güney yönlü eğimi sağlar.
 - Sensörlerden gelen ışık yoğunluğu farkı veya astronomik hesaplamalarla hareket kontrol edilir.

Verim artışı %30–40’a kadar ulaşır (Awasthi et al., 2020).

- **Avantajları:** Maksimum enerji kazanımı.
- **Dezavantajları:** Yüksek yatırım ve bakım maliyetleri, rüzgâr yüklerine karşı hassasiyet.

3. Polar Eksenli Sistemler

Polar eksenli sistemler, paneli Dünya'nın eksen eğikliğine paralel olacak şekilde bir eksen üzerinde döndürür. Bu sayede panel, yıl boyunca güneşin gökyüzündeki açısal hareketini tek eksenle takip eder.

- **Çalışma Prensibi:** Panel eksen, Dünya'nın dönme eksenine ile aynı açıya (yaklaşık $23,5^\circ$) eğimlidir. Gün içinde motor yalnızca tek eksenle hareket ederek güneşi izler.
- **Avantajları:** Çift eksenli sistemlere kıyasla daha az motor kullanır.
- **Dezavantajları:** Eksen eğim açısının doğru hesaplanmaması halinde hassasiyet kaybı yaşanır (Prinsloo & Dobson, 2015).

4. Zaman/Astronomik Tabanlı Sistemler

Bu sistemlerde sensör kullanılmaz. Panellerin hareketi, güneş konum algoritmaları (ör. SPA – Solar Position Algorithm) ile belirlenir.

- **Çalışma Prensibi:**
 - Güneşin azimut ve yükseklik açıları matematiksel olarak hesaplanır.
 - Kontrol ünitesi, motorlara bu açıya uygun sinyal gönderir.
 - Böylece panel, sensörlere gerek kalmadan güneşi doğru konumda takip eder.
- **Avantajları:** Bulutlu havada sensör sapması olmaz.
- **Dezavantajları:** Algoritma hatası veya saat kayması durumunda sistem yanlış konumlanabilir (Mohamed et al., 2024).

5. Hibrit Kontrol Sistemleri

Hibrit sistemler, sensör tabanlı kontrol ile astronomik kontrolü birleştirir.

- **Çalışma Prensibi:**
 - Normal şartlarda astronomik algoritma kullanılır.
 - Sensörler, güneş ışığının gerçek konumunu kontrol ederek hata düzeltmesi yapar.
 - Bu sayede hem güvenilirlik hem de doğruluk sağlanır (Yang & Xiao, 2023).

6. Yapay Zekâ ve Akıllı Takip Sistemleri

Yeni nesil sistemlerde, makine öğrenmesi algoritmaları ve yapay zekâ tabanlı kontrol devreleri kullanılmaktadır.

- **Çalışma Prensibi:**

- Geçmiş hava durumu verileri, ışıınım profilleri ve enerji üretim istatistikleri kullanılır.
- Algoritma gelecekteki güneş konumunu ve ışıınım değişimlerini tahmin eder.
- Paneller optimum açığa yönlendirilir (Varadharajan & Kumarasamy, 2024).

Bu sistemler özellikle şehir ölçekli akıllı şebeke entegrasyonlarında önem kazanmaktadır.

7. MPPT Entegre Sistemler

Mekanik takip sistemlerine ek olarak, Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT) algoritmaları kullanılır.

- **Çalışma Prensibi:**

- PV panellerin akım-gerilim (I–V) karakteristiği sürekli ölçülür.
- Mikrodenetleyici, panellerin en yüksek güç üreteceği çalışma noktasını belirler.
- Gerekirse mekanik açı ayarı ile elektriksel optimizasyon entegre edilir (Kumar, Panda & Rosas-Caro, 2023).

Tablo 1. Güneş Takip Sistemlerinin karşılaştırılması

Sistem Türü	Çalışma Prensipleri	Enerji Kazancı (%)	Avantajlar	Dezavantajlar
Tek Eksenli Sistemler	Paneller doğu-batı ekseninde hareket eder, günlük güneş takibi sağlar.	15–25	Görece düşük maliyet, daha yüksek enerji üretimi	Mevsimsel kuzey-güney açısını takip edemez
Çift Eksenli Sistemler	Paneller hem doğu-batı hem kuzey-güney ekseninde hareket eder.	30–40	Maksimum enerji verimi	Yüksek yatırım ve bakım maliyeti
Polar Eksenli Sistemler	Panel, Dünya eksen eğikliğine paralel olacak şekilde döner.	20–30	Çift eksene göre daha az motor, yüksek doğruluk	Kurulum karmaşıklığı, yanlış açı hassasiyet kaybı
Sensör Tabanlı Aktif Sistemler	LDR/fotodiyot ile ışık yoğunluğu ölçülür, motorlar o yöne döner.	15–25	Hassas kontrol, dinamik tepki	Bulut geçişlerinde yanıltıcı sinyal
Astronomik/Zaman Tabanlı Sistemler	Güneş konum algoritmaları (SPA vb.) ile motorlar kontrol edilir.	15–25	Bulutlu havada sapma yok, yüksek doğruluk	Saat kayması, algoritma hatası riski
Hibrit Sistemler	Sensör ve astronomik algoritmalar birlikte çalışır.	20–30	Hem güvenilir hem hassas	Yüksek sistem maliyeti, karmaşık yapı
Pasif Sistemler	Gaz/sıvı genişlemesiyle panel yön değiştirir.	10–15	Enerji harcamaz, düşük maliyet	Hassasiyet düşük, sıcaklığa bağımlı
Yapay Zekâ Tabanlı Sistemler	Makine öğrenmesi ile geçmiş verilerden optimum açı tahmini yapılır.	25–45	Öngörü ve adaptif kontrol, akıllı şebeke entegrasyonu	Yüksek yazılım/hardware maliyeti

SONUÇ

Güneş enerjisi teknolojileri, hem elektrik hem de ısı enerjisi üretiminde sağladıkları katkılar ile küresel enerji dönüşümünde stratejik bir rol üstlenmektedir. Türkiye gibi yüksek güneşlenme potansiyeline sahip ülkelerde, sabit sistemlerden aktif ve hibrit güneş takip sistemlerine geçiş enerji verimliliğini belirgin şekilde arttırma potansiyeline sahiptir. Geleneksel tek ve çift eksenli sistemler sabit sistemlere kıyasla %15–40 arasında ek enerji üretimi sağlarken, son yıllarda geliştirilen yapay zekâ tabanlı kontrol mekanizmaları bu kazancı daha da ileri taşımaktadır. Makine öğrenmesi ve tahmin algoritmaları sayesinde güneşin konumu, hava koşulları ve ışıyım profilleri daha doğru biçimde öngörülmekte, böylece paneller optimum açığa yönlendirilerek daha istikrarlı ve yüksek düzeyde enerji üretimi elde edilmektedir. Yapay zekâ tabanlı sistemler, yalnızca verim artışı değil aynı zamanda akıllı şebeke entegrasyonu, bakım maliyetlerinin azaltılması ve uzun vadeli işletme güvenilirliği açısından da önemli avantajlar sunmaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, gelecekte güneş enerjisi sistemlerinde en yüksek başarı potansiyelinin, yapay zekâ destekli takip teknolojilerinin yaygınlaşması ile gerçekleşeceği öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- Awasthi, A., Shukla, A. K., SR, M. M., & Dondariya, C. (2020). Review on sun tracking technology in solar PV system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109598. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109598>
- Chandel, R., & Chandel, S. S. (2022). Performance analysis outcome of a 19-MWp commercial solar photovoltaic plant with fixed-tilt, adjustable-tilt, and solar tracking configurations. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. <https://doi.org/10.1002/pip.3458>
- Drury, E., Lopez, A., & Denholm, P. (2014). Relative performance of tracking versus fixed tilt photovoltaic systems in the USA. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. <https://doi.org/10.1002/pip.2373>
- Eiva, U. R. J., Chowdury, T. A., Islam, S. S., Ullah, A., & Tuli, J. N. (2025). Comprehensive analysis of fixed tilt and dual-axis tracking photovoltaic systems for enhanced grid integration and energy efficiency. *Renewable Energy*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148125015290>
- Eke, R., & Senturk, A. (2012). Performance comparison of a double-axis sun tracking versus fixed PV system. *Solar Energy*, 86(9), 2665–2672. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X12002174>
- Evrendilek, F., & Ertekin, C. (2003). Assessing the potential of renewable energy sources in Turkey. *Renewable Energy*, 28(15), 2303–2315. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148103001381>
- Gómez-Gil, F. J., Wang, X., & Barnett, A. (2012). Energy production of photovoltaic systems: Fixed, tracking, and concentrating. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 5379–5392. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111004035>
- Gönül, Ö., Yazar, F., Duman, A. C., & Güler, Ö. (2022). A comparative techno-economic assessment of manually adjustable tilt mechanisms and automatic solar trackers for behind-the-meter PV applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112351. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122006542>
- Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., & Dunlop, E. D. (2015). Solar cell efficiency tables (version 45). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 3–11. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114007487>
- Gupta, M. K., Chauhan, Y. K., & Pachauri, R. K. (2014). A comparative investigation of maximum power point tracking methods for solar PV system. *Renewable*

- and Sustainable Energy Reviews, 50, 402–417.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114001111>
- Hammad, B., Al-Sardeah, A., Al-Abed, M., & Nijmeh, S. (2017). Performance and economic comparison of fixed and tracking photovoltaic systems in Jordan. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 80, 827–839.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117308936>
- Kalogirou, S. A. (2004). Solar thermal collectors and applications. Progress in Energy and Combustion Science, 30(3), 231–295.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128504000103>
- Kaygusuz, K. (2002). Renewable and sustainable energy use in Turkey: A review. Energy Policy, 30(2), 111–117. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421501000488>
- Kaygusuz, K., & Sarı, A. (2003). Renewable energy potential and utilization in Turkey. Energy Conversion and Management, 44(3), 459–478.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890402000614>
- Kelly, N. A., & Gibson, T. L. (2009). Improved photovoltaic energy output for cloudy conditions with a solar tracking system. Solar Energy, 83(11), 2092–2102.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X09001923>
- Koussa, M., Cheknane, A., Hadji, S., & Haddadi, M. (2011). Measured and modelled improvement in solar energy yield from flat plate photovoltaic systems utilizing different tracking systems and under a range of environmental conditions. Applied Energy, 88(5), 1756–1771. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261910005088>
- Kumar, M., Panda, K. P., & Rosas-Caro, J. C. (2023). Comprehensive review of conventional and emerging maximum power point tracking algorithms. IEEE Transactions on Power Electronics. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10083133/>
- Melikoglu, M. (2017). Energy storage: Analysing global development and assessing potential applications in Turkey based on Vision 2023 targets. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 75, 365–378.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117300680>
- Mohamed, A. K. B., Mohamed, H., & Yacob, N. S. (2024). Solar tracking control systems design strategies: A review. AIP Conference Proceedings, 2799(1), 020046. <https://doi.org/10.1063/5.0253984>
- Mousazadeh, H., Keyhani, A., Javadi, A., & Mobli, H. (2009). A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(8), 1800–1818.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.01.022>

- Ozgur, M. A. (2008). Review of Turkey's renewable energy potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(3), 609–631. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148108000530>
- Polman, A., Knight, M., Garnett, E. C., Ehrler, B., & Sinke, W. C. (2016). Photovoltaic materials: Present efficiencies and future challenges. *Materials Today*, 19(6), 365–377. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702116301661>
- Prinsloo, G., & Dobson, R. T. (2015). Solar tracking: Hardware, control and simulation. Stellenbosch University, eBook. https://www.academia.edu/download/46666252/Solar_Tracking_eBook__Hardware_Prinsloo2015.pdf
- Racharla, S., & Rajan, K. S. (2017). Solar tracking system – A review. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 9(4), 042701. <https://doi.org/10.1063/1.4994052>
- Sawicka-Chudy, P., & Sibiński, M. (2018). Comparison of solar tracking and fixed-tilt photovoltaic modules in Lodz. *Journal of Solar Energy Engineering*, 140(2), 024503. <https://asmedigitalcollection.asme.org/solarenergyengineering/article-abstract/140/2/024503/367938>
- Sözen, A., Arcaklioğlu, E., Özalp, M., & Kanit, E. G. (2005). Solar-energy potential in Turkey. *Applied Energy*, 80(4), 367–381. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261904000893>
- Sukhatme, S. P., & Nayak, J. K. (2017). *Solar Energy: Principles of Thermal Collection and Storage* (4th ed.). Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-31641-0>
- Toklu, E. (2013). Overview of potential and utilization of renewable energy sources in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 129–135. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148112003862>
- Tyagi, V. V., Kaushik, S. C., & Tyagi, S. K. (2012). Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1383–1398. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111006058>
- Varadharajan, D. P., & Kumarasamy, S. (2024). A comprehensive review on single axis solar tracking system using artificial intelligence. In *Artificial Intelligence for Renewable Energy Systems* (pp. 231–258). IGI Global. <https://www.igi-global.com/chapter/a-comprehensive-review-on-single-axis-solar-tracking-system-using-artificial-intelligence/346131>

- Yang, Z., & Xiao, Z. (2023). A review of the sustainable development of solar photovoltaic tracking system technology. *Energies*, 16(23), 7768. <https://doi.org/10.3390/en16237768>
- Yaniktepe, B., Kara, O., & Ozalp, C. (2017). The global solar radiation estimation and analysis of solar energy: Case study for Osmaniye, Turkey. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 12(10), 917–923. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15435075.2017.1329148>



BÖLÜM 14

Sıcak Çalışmalarda İş Sağlığı ve Güvenliği Üzerine Bir İrdeleme

Arda YILMAZ¹

GİRİŞ

İş sağlığı ve güvenliği (İSG), çalışanların mesleki risklere karşı korunması ve iş yerlerinde güvenli bir ortam sağlanması amacıyla geliştirilen sistematik uygulamalar bütünüdür. Sıcak ortamlarda çalışma konusu ise özellikle küresel ısınma, iklim değişikliği ve sanayileşmeyle birlikte daha da önem kazanan bir İSG alanıdır. Giderek artan sıcaklık değerleri, özellikle açık alanda çalışanlar için ciddi sağlık risklerini beraberinde getirmektedir. Türkiye gibi dört mevsimi yaşayan ülkelerde, yaz aylarında sıcaklıkların 40°C'ye kadar ulaştığı bölgelerde inşaat, tarım, maden ve sanayi sektörlerinde çalışanlar, termal stres, ısı çarpması, dehidrasyon ve dikkat kaybı gibi sağlık sorunlarına maruz kalmaktadır (ILO, 2019; WHO, 2022). Sıcaklık sadece fizyolojik etkilerle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda iş kazalarının artmasına, üretkenliğin düşmesine ve iş kalitesinin azalmasına neden olmaktadır. Yapılan araştırmalar, sıcak ortamlarda çalışan bireylerde tepki sürelerinin uzadığını, dikkat düzeylerinin azaldığını ve yorgunluğa bağlı hata oranlarının arttığını göstermektedir (Parsons, 2014). Bu durum hem bireysel hem de kurumsal düzeyde ciddi ekonomik ve sosyal kayıplar doğurmaktadır. Bu çalışma, sıcak ortamlarda çalışan işçilerin karşı karşıya kaldığı sağlık ve güvenlik risklerini değerlendirmek, bu risklerin önlenmesine yönelik bilimsel ve uygulamalı çözüm önerileri sunmak amacıyla hazırlanmıştır. Aynı zamanda Türkiye'deki yasal mevzuat çerçevesinde işverenlerin ve çalışanların yükümlülükleri analiz edilerek, daha güvenli ve sağlıklı çalışma ortamları oluşturulması hedeflenmiştir.

İSG'NİN TARİHÇESİ VE SICAK ORTAMLARDA ÇALIŞMANIN LİTERATÜRDEKİ YERİ

İş sağlığı ve güvenliği kavramı tarihsel süreç içerisinde çeşitli evrelerden geçerek günümüze kadar gelmiştir. Antik Yunan ve Roma dönemlerinden itibaren çalışanların fiziksel koşullarını iyileştirmeye yönelik çabalar gözlemlense de modern anlamda İSG, 18. yüzyıldaki sanayi devrimiyle birlikte ortaya çıkmıştır (Rosen, 1993). Özellikle Almanya'da Ramazzini'nin işçi hastalıkları üzerine yazdığı eser, iş sağlığına sistematik bir bakış kazandırmıştır (Franco et al., 2004). Günümüzde ise İSG, yalnızca iş kazalarını önlemeyi değil, aynı zamanda mesleki hastalıkları ve çevresel riskleri de azaltmayı

¹ A İGU, Serbest Çalışan, ORCID: 0000-0002-0950-5502

hedeflemektedir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO), Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO) ve Avrupa İş Sağlığı ve Güvenliği Ajansı (EU-OSHA) gibi kurumlar bu alanda uluslararası standartları belirlemektedir (WHO, 2022). Sıcak ortamlarda çalışma ise, son yıllarda özellikle iklim değişikliği etkisiyle daha fazla gündeme gelen bir konudur. ILO (2019), küresel ısınmanın iş gücü üzerinde doğrudan etkileri olduğunu ve sıcak stresinin 2030'a kadar dünya genelinde 80 milyon tam zamanlı iş gücü kaybına yol açabileceğini öngörmektedir. Xiang et al. (2014), Avustralya'da yaptıkları çalışmada 35°C üzerindeki sıcaklıklarda çalışan bireylerde baş dönmesi, bulantı ve dikkat dağınıklığı gibi semptomlara sıklıkla rastlandığını belirtmiştir. Ayrıca Hindistan, Meksika ve Suudi Arabistan gibi sıcak iklim bölgelerinde yapılan saha araştırmaları, sıcaklıkla bağlantılı iş kazalarının ve verimlilik kayıplarının daha yüksek olduğunu göstermektedir (Sahu et al., 2013; Kjellstrom et al., 2016). Türkiye'de ise bu konuya yönelik sınırlı sayıda akademik yayın bulunmakla birlikte, son yıllarda yapılan çalışmalar açık alan çalışanlarının yüksek risk altında olduğunu ortaya koymuştur (Özkan & Yıldırım, 2020). İş sağlığı politikalarının sıcak ortamlarda çalışmaya özel çözümler üretmesi, bu bağlamda oldukça önemlidir. Eğitim, KKD kullanımı, teknik iyileştirmeler ve organizasyonel tedbirler; sıcaklık kaynaklı sağlık sorunlarını ve kazaları azaltmada etkili stratejilerdir (Parsons, 2014).

BULGULAR

Sıcak ortamlarda çalışma koşulları, çalışan sağlığını tehdit eden ciddi sorunlar ortaya çıkarmaktadır. Alan araştırmaları ve mevcut literatür ışığında yapılan değerlendirmelere göre, yüksek sıcaklıklara maruz kalan çalışanlarda performans düşüklüğü, dikkat dağınıklığı, baş ağrısı, mide bulantısı, aşırı yorgunluk ve bilinç kaybına kadar giden sağlık sorunları sıklıkla görülmektedir (Xiang et al., 2014; Gubernot et al., 2015). Örneğin, inşaat ve madencilik sektörlerinde çalışan işçilerin %60'ından fazlasının günde yeterli sıvı tüketmediği saptanmıştır (Özkan & Yıldırım, 2020). Ayrıca yüksek sıcaklık koşullarında çalışanların ter yoluyla kaybettikleri tuz ve sıvıyı yerine koymamaları, ısı krampı ve ısı bitkinliği gibi klinik tabloların ortaya çıkmasına yol açmaktadır. Yapılan saha çalışmaları ve anket sonuçları, işverenlerin yalnızca %35'inin sıcak ortam koşullarına karşı etkin önlemler aldığını göstermektedir. Bu önlemlerin başında gölgelik alanların oluşturulması, çalışma saatlerinin sabah ve akşam serin saatlere çekilmesi ve serinleme molalarının artırılması gelmektedir. Bununla birlikte, özellikle küçük işletmelerde sıcak ortam kaynaklı risklerin yeterince değerlendirilmediği ve çalışanların uygun KKD (örneğin ısıya dayanıklı eldivenler, açık renkli nefes alabilir giysiler) ile donatılmadığı görülmektedir (ILO, 2019; OSHA, 2020). İş kazaları açısından değerlendirildiğinde, sıcaklık artışına paralel olarak iş kazalarının da yükseldiği dikkat çekmektedir. Türkiye İş Kazaları İstatistikleri'ne göre, Temmuz ve Ağustos aylarında gerçekleşen kazaların oranı yıl ortalamasının

%27 üzerindedir. Bu durum, sıcaklığın fiziksel performansı ve dikkat düzeyini olumsuz etkilediğini göstermektedir. Termal konfor koşullarının iyileştirildiği, havalandırma sistemlerinin aktif olduğu ve iş organizasyonunun doğru yapıldığı işletmelerde ise verimlilikte %20'ye varan artış, devamsızlıkta ise %30'a varan azalma tespit edilmiştir (Kjellstrom et al., 2016).

TARTIŞMA

Sıcak ortamlarda çalışan bireylerin maruz kaldığı riskler yalnızca fizyolojik değil, aynı zamanda psikolojik ve sosyo-ekonomik boyutları da içermektedir. Çalışanların ısıya bağlı yorgunluk yaşaması, dikkat dağınıklığı ve reaksiyon sürelerinde yavaşlama, iş kazalarının artmasına neden olduğu gibi üretim verimliliğini de doğrudan etkilemektedir (Sahu et al., 2013; Xiang et al., 2014). Ayrıca sıcaklık stresi altında çalışan bireylerde ruhsal tükenmişlik, anksiyete ve agresyon gibi belirtiler de gözlemlenmektedir. Bu etkiler, sadece bireyin değil tüm işyerinin güvenliğini ve huzurunu tehdit edebilmektedir. Sıcaklık kaynaklı risklerin önlenmesi için uygulanabilecek teknik önlemler arasında ortam sıcaklığının dijital termometrelerle sürekli izlenmesi, soğutucu fan ve iklimlendirme sistemlerinin kurulması, radyant ısı yalıtımı sağlanması, UV koruyucu iş giysilerinin temin edilmesi gibi faktörler sayılabilir. Yönetsel önlemler ise işin günün serin saatlerine çekilmesi, 30 dakikada bir kısa dinlenme araları verilmesi, düzenli sıvı alımının izlenmesi, çalışanların iş yüküne göre vardiya sistemiyle çalıştırılması ve sıcaklık ölçümlerinin kayıt altına alınmasını içermektedir (OSHA, 2020; WHO, 2022). Eğitim programları, iş sağlığı kültürünün gelişmesinde temel rol oynamaktadır. Sıcaklık stresine ilişkin farkındalık oluşturmak, sadece sağlık risklerini azaltmakla kalmaz, aynı zamanda çalışanların üretkenliğini artırır ve iş yerinde olumlu bir güvenlik iklimi yaratır (Parsons, 2014). Sıcak havalarda çalışan işçilerin semptomları tanıyabilmesi, kendilerini ve arkadaşlarını uyarması, ciddi bir krizin önüne geçebilir. Ayrıca acil durum müdahale planlarının sıcak çarpması gibi senaryoları da kapsayacak şekilde güncellenmesi hayati öneme sahiptir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma göstermektedir ki, sıcak ortamlarda çalışma koşulları çalışan sağlığı ve güvenliği açısından çok boyutlu riskler içermektedir. Yüksek sıcaklıkların neden olduğu fizyolojik bozulmalar, üretim sürecinin aksamasına ve hatta can kaybına yol açabilecek ciddi iş kazalarına neden olabilmektedir. Bu nedenle işverenlerin, sıcak ortamlarda çalışanlar için özel önlemler alması bir tercihten öte zorunluluktur. Çalışmanın bulgularına göre, sıcak ortamlarda çalışan işçilerin korunabilmesi için aşağıdaki öneriler geliştirilmiştir:

- Ortam sıcaklıklarının düzenli olarak ölçülmesi ve kayıt altına alınması,

- Uygun kişisel koruyucu donanımların sağlanması,
- İş organizasyonlarının sıcaklığa göre planlanması,
- Çalışanlara yönelik düzenli eğitim programlarının uygulanması,
- Yeterli ve erişilebilir su kaynaklarının temin edilmesi,
- Gölgeleştirme ve havalandırma sistemlerinin oluşturulması,
- Acil durum planlarının sıcak stresine göre güncellenmesi.

Sonuç olarak, sıcak ortamlarda güvenli ve sağlıklı bir çalışma ortamı sağlamak, yalnızca çalışanların yaşam kalitesini artırmakla kalmaz, aynı zamanda iş yerinin sürdürülebilirliğine ve üretkenliğine de katkı sağlar. Bu bağlamda mevzuatın etkin şekilde uygulanması, işyeri denetimlerinin artırılması ve İSG kültürünün kurumsal düzeyde yerleşmesi gerekmektedir.

Teşekkür: Gerek akademik gerekse iş kariyerimi sekteye uğratmaya çalışan herkese teşekkürü bir borç bilirim.

KAYNAKÇA

- Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı. (2013). 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu. Resmî Gazete (28339).
- Franco, G., et al. (2004). Bernardino Ramazzini: The Father of Occupational Medicine. *American Journal of Public Health*, 94(6), 829–830.
- ILO. (2019). Working on a warmer planet: The impact of heat stress on labour productivity and decent work. International Labour Organization.
- Kjellstrom, T., Holmer, I., & Lemke, B. (2016). Workplace heat stress, health and productivity—an increasing challenge for low and middle-income countries during climate change. *Global Health Action*, 9(1), 321–335.
- NIOSH. (2016). Criteria for a Recommended Standard: Occupational Exposure to Heat and Hot Environments. U.S. Department of Health and Human Services.
- OSHA. (2020). Occupational Heat Exposure. Occupational Safety and Health Administration. <https://www.osha.gov/heat-exposure>
- Özkan, G., & Yıldırım, A. (2020). Sıcak hava koşullarında çalışan işçilerin sağlık durumlarının değerlendirilmesi. *İş ve Toplum Dergisi*, 30(1), 65–82.
- Parsons, K. (2014). Human thermal environments: The effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort, and performance. CRC Press.
- Resmî Gazete. (2013). Çalışanların İşyerinde Maruz Kaldığı Fiziksel Etkenlere İlişkin Yönetmelik. (28722).
- Rosen, G. (1993). A History of Public Health. Johns Hopkins University Press.
- Sahu, S., Sett, M., & Kjellstrom, T. (2013). Heat exposure, cardiovascular stress and work productivity in rice harvesters in India: implications for a climate change future. *Industrial Health*, 51(4), 424–431.
- TÜRKAK. (2019). TS EN ISO 7243: Sıcak ortamlarda termal stresin belirlenmesi.
- WHO. (2022). Occupational health: A manual for primary health care workers. World Health Organization.
- Xiang, J., Hansen, A., Pisaniello, D., & Bi, P. (2014). Health impacts of workplace heat exposure: an epidemiological review. *Industrial Health*, 52(2), 91–101.



BÖLÜM 15

Nano Katkılı Minimum Miktarda Yağlama (NANO-MMY) Yöntemi: Sürdürülebilir İmalatta Yeni Bir Yaklaşım

Hakan Yurtkuran¹

1. GİRİŞ

İmalat süreçlerinde sürdürülebilir yaklaşımların geliştirilmesi birçok faktörün bir araya getirilmesiyle meydana gelmektedir. Bu faktörlerin başında işlenebilirlik operasyonlarında çevre kirliliği ve atık yönetiminin kontrolü ilk sıralarda yer almaktadır. Günümüzde talaşlı imalat süreçlerinde genellikle kuru kesme kullanılırken işlenebilirliği zor malzemelerde kesme sıvıları kullanımı zorunlu hale gelmektedir. Kesme sırasında ortaya çıkan aşırı sıcaklık, sürtünme ve beraberinde gelen takım aşınmasını minimize etmek amacıyla kesme sıvıları kullanılmaktadır. Kesme sıvılarının olumlu etkilerinin yanında olumsuz etkileri de vardır. Bu olumsuz etkilerinden en önemlisi çevreye ve insan sağlığına verilen zararlardır. Taşkın soğutma olarak adlandırılan ve gereğinden fazla kesme sıvısı kullanımına yol açan klasik soğutma/yağlama yöntemleri çevreye ve insan sağlığına ciddi zararlar vermektedir. Klasik soğutma/yağlama yöntemlerinin operatör sağlığında cilt hasarı ve kanseri başta olmak üzere solunum sistemleri gibi hayati bileşenlere zararlar verdiği bilinmektedir. Araştırmacıların temiz toplum ve temiz çevre bilincinden yola çıkarak yaptıkları çalışmalarda çevre kirliliğinin önüne geçmek için yeni yöntemler geliştirdiği görülmektedir. Kuru kesme yöntemi kesme sıvısı kullanılmadığı için her ne kadar uygun bir yöntem olarak görülse de işlenebilirliği zor malzemelerde kesici takım ile iş parçası arasında sürtünmeyi arttırdığı için tercih edilebilir bir yöntem olmaktan çıkmaktadır. Bunun sebebi hızla artan takım aşınması ve dolayısıyla artan üretim maliyetleri olarak karşımıza çıkar. Kuru kesmeye bir anlamda alternatif olarak geliştirilen Minimum Miktarda Yağlama (MMY) yöntemi hem daha çevreci hem de daha ekonomik bir soğutma/yağlama yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. MMY yöntemi 1990'lı yıllarda endüstriyel uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. MMY tekniği geleneksel sistemlere kıyasla çok daha az kesme sıvısı kullanarak kuru kesmeye göre daha yüksek yüzey kalitesi elde edilmesini ve kesici takım aşınmasının azaltılmasını sağlamaktadır. İlk olarak Almanya ve Japonya'da uygulamaya konulan bu yöntem üretim maliyetlerini düşürürken

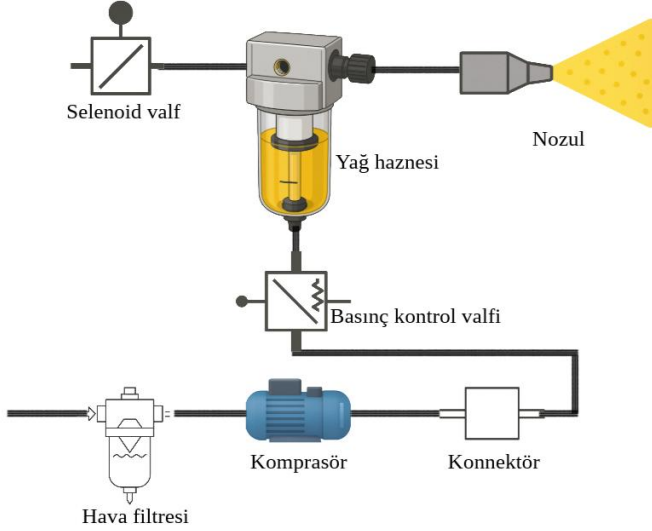
¹ Dr. Öğr. Üyesi, Yozgat Bozok Üniversitesi, ORCID: 0000-0003-2375-7316

ürün kalitesinde kayıp yaşanmamasını ve çevresel etkilerin minimize edilmesini hedeflemiştir. Bu özellikleri sayesinde MMY geleneksel yağlama tekniklerine alternatif çevre dostu bir yaklaşım olarak yaygın kabul görmüştür. MMY yöntemi geleneksel yağlama tekniklerine göre önemli avantajlar sunmasına rağmen özellikle yüksek kesme hızlarında ve zor işlenebilir malzemelerde kesme bölgesindeki ısının yeterince uzaklaştırılamaması önemli bir sınırlılıktır. Ayrıca kullanılan yağın miktarının düşük olması nedeniyle soğutma etkisi kısıtlı kalmakta ve bazı durumlarda yüzey kalitesi istenen düzeyin altına düşebilmektedir. Bu sınırlılıklar araştırmacıları MMY yönteminin performansını artıracak yeni yaklaşımlar geliştirmeye yöneltmiştir. Son yıllarda bu doğrultuda yapılan çalışmalarda yağ içerisine nano boyutlu katkı maddelerinin eklenmesiyle oluşturulan Nano-MMY yöntemi yer almaktadır. Nano katkılarının yüksek ısı iletkenliği ve üstün yağlama özellikleri sayesinde kesme bölgesinde daha kararlı bir yağlama filmi oluşmakta ısı dağılımı iyileşmekte ve takım aşınmaları önemli ölçüde azalmaktadır. Nano-MMY yöntemi hem verimlilik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından geleneksel sistemlere göre daha üstün bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Son yıllarda sürdürülebilir üretim yaklaşımlarının önem kazanmasıyla birlikte Nano-MMY yöntemi talaşlı imalat alanında dikkat çeken bir araştırma konusu hâline gelmiştir. Bu yöntem klasik MMY sisteminin çevre dostu yapısını korurken nano katkılarının ısı iletkenliği ve yağlama özelliklerinden yararlanarak kesme performansını iyileştirmeyi amaçlar. Böylece hem yüzey kalitesi artmakta hem de kesici takım ömrü uzamaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar Nano-MMY uygulamalarının enerji tüketimini azaltırken üretim verimliliğini de artırabileceğini göstermektedir (Xu vd., 2022)(Ahmadi vd., 2019). Bu yönüyle yöntem çevresel etkileri azaltan ve endüstriyel ölçekte uygulanabilirliği giderek artan modern bir yağlama stratejisi olarak değerlendirilmektedir.

2. MMY YÖNTEMİ: TEMELLER VE SINIRLILIKLAR

Soğutma sıvısına alternatif bir yöntem olarak geliştirilen MMY yönteminde genellikle çok az miktarda bitkisel esaslı yağ kullanılır. Oluşan yağ sisi takım talaş ve takım-iş parçası ara yüzeyine nüfuz eder. Bu işlemin daha etkili ve sağlıklı gerçekleşmesi için bir miktar basınçlı hava kullanılır. Bu sayede işleme esnasında oluşan sürtünme ve kesme kuvvetleri azaltılır. Minimum miktarda yağlama tekniği iki farklı şekilde uygulanabilir. Birincisinde sabit nozullar aracılığıyla dışarıdan püskürtme yapılır. Basıncın artmasıyla birlikte kesme sıvısının havayla karışmadan aktarımı sağlanır. Kesme sıvısı/yağı atomize olmuş bir şekilde hava ile karışarak nozul yoluyla iş parçasına püskürtülür. İkinci teknikte ise yağ sisi takım içinde açılmış kanallar aracılığıyla püskürtülür. Ayrıca bu sistemler kendi içinde tek kanallı ve çift kanallı olmak üzere ikiye ayrılır. Tek

kanallı sistemde hava ve yağ karışımı bir sistem içerisinde hazırlanarak püskürtülür, çift kanallı sistemde ise hava ve yağ ayrı ayrı nozul içine ya da kesici takım içine gelir ve orada karıştırılır. Şekil 1’de klasik bir MMY sisteminin şematik gösterimi verilmiştir.



MMY yöntemi, geleneksel yağlama sistemlerine kıyasla çevresel ve ekonomik açıdan önemli avantajlar sağlamasına rağmen, bazı teknik sınırlılıklara da sahiptir. Özellikle yüksek kesme hızlarında ve zor işlenebilir malzemelerin talaş kaldırma işlemlerinde, kullanılan düşük miktardaki yağın soğutma kapasitesi sınırlı kalmaktadır. Bu durum ısı birikim ve takım aşınması gibi olumsuz sonuçlara yol açabilir. Ayrıca sistemde kullanılan nozulların konumu, püskürtme açısı ve hava basıncı gibi parametreler, yağlama etkinliğini doğrudan etkileyen kritik faktörlerdir. Bu parametrelerdeki küçük değişimler bile, yüzey kalitesi ve kesme kuvvetleri üzerinde belirgin farklılıklara neden olabilmektedir. Bir diğer önemli sınırlama hava ve yağ karışımının homojenliği ile ilgilidir. Atomizasyonun yeterince verimli olmaması yağ damlacıklarının düzgün dağılmamasına ve dolayısıyla yağlama filminin kararsız hale gelmesine yol açar. Ayrıca sistemde kullanılan yağların viskozitesi ve çevresel sıcaklık koşulları, püskürtme karakteristiğini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bu faktörler göz önüne alındığında MMY sisteminin performansını artırmak için yeni yaklaşımlara ihtiyaç duyulmuştur. Son yıllarda bu doğrultuda yapılan araştırmalar nano boyutlu katkı maddeleriyle zenginleştirilmiş yağların kullanıldığı Nano-MMY sistemlerine odaklanmıştır (Mousavi, Heris, & Estellé, 2020). Bu sistemlerde nano partiküllerin yüksek ısı iletkenliği ve üstün yağlama

özellikleri sayesinde hem kesme sıcaklıklarının düşürülmesi hem de takım ömrünün uzatılması mümkün hale gelmiştir.

3. NANO KATKILI MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMA (NANO-MMY) YÖNTEMİ

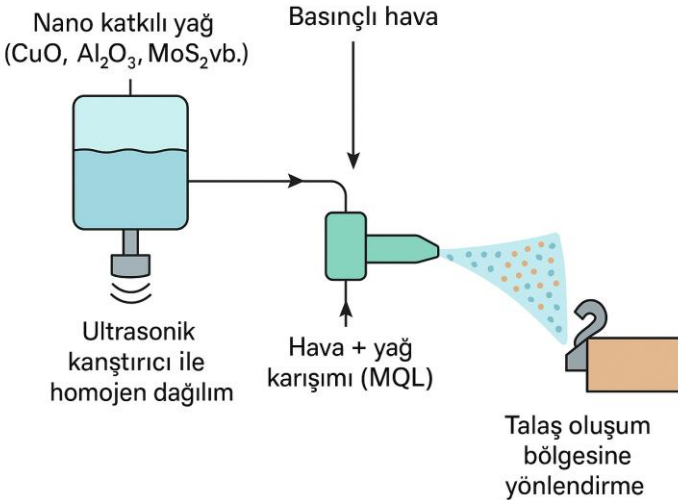
3.1. Nano Katkılı Yağlama Kavramı ve Gelişim Süreci

Nano katkıların yağlama sistemlerinde kullanımı 2000’li yılların başlarından itibaren hızla gelişen nanoteknoloji araştırmalarının bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. İlk çalışmalar nano boyuttaki katı partiküllerin tribolojik özellikleri üzerinde yoğunlaşmıştır (H. Wu vd., 2017). Bu partiküllerin sürtünmeyi azaltıcı, aşınmayı önleyici ve ısı iletkenliğini artırıcı etkileri tespit edilmiştir. Daha sonra bu nano partiküllerin kesme sıvılarına eklenmesiyle yağlama etkinliğinin artırılabilceği yönünde önemli bulgular elde edilmiştir. Bu gelişmeler akabinde Minimum Miktarla Yağlama (MMY) sistemlerinde de nano katkıların kullanımı gündeme gelmiş ve böylece Nano Katkılı Minimum Miktarla Yağlama (Nano-MMY) yaklaşımı doğmuştur. Nano katkıların yağ içerisinde homojen dağılmasıyla oluşturulan bu sistem klasik MMY yöntemine göre daha kararlı bir yağ filmi, daha yüksek ısı transferi ve daha düşük takım aşınması sağlamıştır.

3.2. Nano Katkı Türleri ve Özellikleri

Nanoakışkanlar 100 nm veya daha küçük boyutlardaki nanoparçacıkların esas kesme yağına eklenmesiyle oluşturulan karışımlardır. Bu nanoakışkanlar saf akışkanlardan daha yüksek ısı transfer katsayılarına sahip oldukları için sistemin ısı verimi artmaktadır. Nano katkılı yağlama teknolojilerinin gelişimiyle birlikte kullanılan nanopartiküllerin türü ve özellikleri tribolojik performans üzerinde belirleyici etkenlerden birisi haline gelmiştir. Bu katkı maddeleri genel olarak metalik, metal oksit, katmanlı, karbon esaslı ve hibrit yapıdaki nanopartiküller olarak sınıflandırılmaktadır. Bu gruplardan her bir tür sahip olduğu fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre kesme bölgesinde çeşitli etkiler göstermektedir. Bu sebeple uygun nanopartikül seçimi MMY yönteminin doğruluğu ve kalitesi açısından önemlidir. Metalik nanopartiküller (Cu, Ag, Al, Ni. vb.) sahip oldukları yüksek ısı iletkenlik sayesinde kesme bölgesinde meydana gelen ısıyı hızlıca uzaklaştırarak takım-talaş arayüzünde sıcaklıkla alakalı deformasyonların oluşmamasını sağlar. Fakat bu tür katkıların oksidasyon eğilimleri -özellikle yüksek sıcaklıklarda- yağlayıcının kararlılığını olumsuz etkileyebilir. Bu sebeple bu katkı partiküllerinin kullanımında oran ve sıcaklık kontrolü yapılması gereklidir. Metal oksit nanopartiküller (Al_2O_3 , TiO_2 , ZnO , CuO vb.) yüksek kimyasal kararlılığa sahiptir. Bu katkıların en önemli özelliklerinden birisi sert yapıları sayesinde kesici takımın aşınma direncini arttırmalarıdır. Ayrıca talaşlı imalat sırasında iş parçası yüzeyinde mikro düzeyde bir ince film tabakası

oluşturarak yüzey pürüzlülüğünü iyileştirirler. En kritik dezavantajları yüksek konsantrasyonlarda kullanıldıklarında viskozite artışına neden olarak yağın akışkanlığını azaltabilirler. Bu nedenle katkı oranının dengeli ayarlanması gerekmektedir. Katmanlı yapıdaki nanopartiküller özellikle molibden disülfür (MoS_2), tungsten disülfür (WS_2), hekzagonal bor nitrür (h-BN) ve grafit gibi tabaka yapısına sahip malzemelerden oluşur. Bu katkılar tabakalar arasındaki zayıf Van der Waals bağları sayesinde kolayca kayarak kesme bölgesinde düşük sürtünme katsayısı oluştururlar. Böylelikle hem yüzey pürüzlülüğünde iyileşme hem de takım aşınmasında azalma görülmektedir. İşlenebilirliği zor malzemelerde genellikle bu tür nanopartiküller tercih edilir. Karbon esaslı nanopartiküller arasında karbon nanotüpler (CNT), grafen, nanodiamond ve fullerene (C_{60}) gibi yapılar yer almaktadır. Bu nanopartiküller üstün mekanik dayanım ve mükemmel termal iletkenlikleri sayesinde kesici takımın ısıl yükünü azaltırlar. Bu azalma sonucunda daha kararlı bir kesme süreci oluşur. Bunun yanında benzer şekilde yüzeyde ince ve nispeten dayanıklı bir film tabakası oluşturarak yüzey pürüzlülük deneylerinde kayda değer iyileştirmeler sunarlar. Fakat bu partiküllerin homojen şekilde dağılması zordur. Dolayısıyla hazırlanma aşamasında ultrasonik ve manyetik karıştırıcılar kullanılmaktadır. Homojen bir dağılım gerçekleşmediği takdirde toplanma olabilir ve bu durum yağlama kalitesini olumsuz etkileyebilir. Şekil 2’de nanopartikül katkılı örnek bir MMY sistemi şematize edilmiştir.



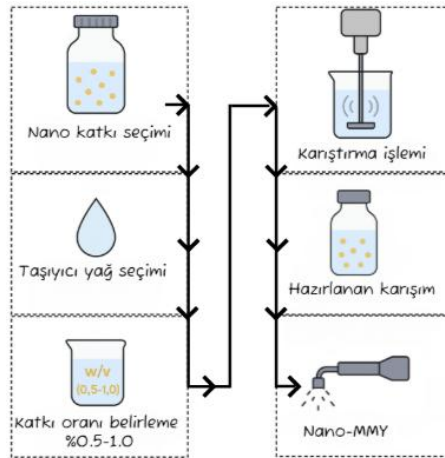
Şekil 2. Nanopartikül içerikli bir MMY sistemi.

Hibrit nanopartiküller ise iki veya daha fazla türden katkının bir arada kullanılmasıyla elde edilir. Bu tip karışımlar farklı nanopartiküllerin olumlu özelliklerini bir araya getirerek daha etkili bir soğutma/yağlama performansı oluşturur. Örneğin eklenen bir katkı ısı iletkenliğini arttırırken diğer katkı sürtünmeyi azaltabilir. Literatürde hibrid nano katkılı MMY yağlarının yüzey pürüzlülüğünde %20–40 oranında iyileşme ve takım aşınmasında belirgin azalma sağladığı belirtilmiştir (Makhesana, Patel, & Bagga, 2022). Bu durumda hibrid sistemlerin gelecekte nano katkılı MMY uygulamalarında önemli bir yer edineceğini göstermektedir. Sonuç olarak kullanılan her nanopartikülün avantajlı ve dezavantajlı yönleri bulunmaktadır. Örneğin metal oksit nanopartiküller yüksek sıcaklıklarda kararlılık sağlarken katmanlı yapı ve karbon esaslı katkılar düşük sürtünme katsayısı sayesinde yüzey kalitesini arttırmaktadır.

3.3. Nano Katkıların Hazırlanma Prosesi

Nano katkılı minimum miktarda yağlama (Nano-MMY) sistemlerinde elde edilen performansın kalitesi büyük ölçüde nano katkılı yağın hazırlanma yöntemine bağlıdır. Bunun nedeni nanopartiküllerin homojen dağılmadığı karışımlarda topaklanma oluşmasıdır. Bu durum püskürtme sırasında kesme bölgesine akışın verimsizleşmesine ve nozulun tıkanmasına yol açmaktadır. Hazırlama prosesi genelde üç aşamadan oluşur bu aşamalar katkı seçimi, taşıyıcı sıvının belirlenmesi, katkı oranının tayini ve homojenizasyon işlemleridir. Hazırlama sürecinin ilk adımı kullanılacak nanopartikül türünün ve boyut aralığının belirlenmesidir. Seçim yapılırken hedeflenen tribolojik iyileştirmeler göz önüne alınır. Örneğin Al_2O_3 ve TiO_2 partikülleri aşınma direncini arttırmak amacıyla tercih edilirken, MoS_2 ve h-BN gibi lamelli yapıli katkılar sürtünmeyi azaltmak için kullanılır. Grafen ve CNT gibi karbon esaslı katkılar ise hem termal iletkenlik hem de yüzey kalitesi açısından avantaj sağlar. Partikül boyutu genellikle 20-100 μm aralığında seçilir. Partiküllerin çok küçük olması birbirlerine yapışarak kümeleşmesine yol açmaktadır. Çok büyük partiküller ise nozuldan geçemez ve tıkanma problemleri oluşabilir. Nano katkılar uygun bir taşıyıcı yağ içerisinde hazırlanarak MMY sistemine aktarılır. Taşıyıcı yağ seçimi genellikle bitkisel esaslı yağlar (kanola, Ayçiçek, palm, ester türevleri) olup hem çevresel hem de tribolojik özelliklere göre tercih edilir. Bununla birlikte yüksek sıcaklıklı işlemlerde sentetik ester yağları daha stabil performans sunmaktadır. Taşıyıcı yağın yüzey gerilimi, vizkozitesi, nanopartiküllerin dağılım davranışını doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple nano katkı-yağ çiftinin kimyasal uyumluluğu önceden belirlenmelidir. Katkı oranı yağlayıcının performansı ve dolayısıyla işlenebilirlik performansını belirleyen önemli bir faktördür. Genellikle nanopartikül oranı %0.1 ile %2 (ağırlıkça) aralığında seçilir. Daha

düşük oranlarda istenen tribolojik etki elde edilemezken aşırı yüksek oranlarda vizkozite artışı ve partikül birikimi nedeniyle püskürtme performansı düşebilir nozul tıkanabilir. Literatürde optimum katkı oranının çoğunlukla %0.5–1.0 aralığında olduğu bildirilmektedir. Ayrıca farklı katkı türleri birlikte kullanıldığında (örneğin Al_2O_3 + CNT) her bir katkının oranı ayrı ayrı optimize edilmelidir (J. Wu vd., 2022). Şekil 3'te nano katkılarının hazırlanma süreci ana hatlarıyla gösterilmiştir. Katkı oranı belirlendikten sonra karışımın homojen hale getirilmesi için gerekli olan teknikler uygulanır. Bu kısım nanopartiküllerin toplanma ya da kümelenme eğilimini azaltmak ve kararlı bir akış oluşturmak için kritik öneme sahiptir. En yaygın olarak kullanılan homojenizasyon işlemleri manyetik karıştırma, ultrasonik karıştırma ve yüksek hızlı homojenizatörlerdir. Bu işlemler sırasında sıcaklık artışı kontrol altında olmalıdır. Çünkü yüksek sıcaklık yağın kimyasal yapısını bozabilmektedir. Bazı durumlarda karışım içerisine surfaktan (yüzey aktif madde) eklenerek nanopartikül yüzeyine kimyasal bağlanma sağlanır ve böylece homojenizasyon kalitesi artırılmış olur. Son aşamada hazırlanan nano katkılı yağın kararlılığı test edilir. Test aşamasında en basit yöntem belirli bir süre boyunca -örneğin 7 gün- çökme gözlemi yapmaktır. Eğer çökme gözlenirse karıştırma süresi veya surfaktan oranı yeniden düzenlenir. Sonuç olarak nano katkılı yağın hazırlanma prosesi sistemin ve işleme verimliliğinin etkinliğini belirleyen temel adımdır. Katkı türü, taşıyıcı yağ, oran ve karıştırma yöntemi doğru seçildiğinde elde edilen karışım hem uzun süre stabil kalmaktadır hem de MMY sistemine sağlıklı bir şekilde aktarılmaktadır. Bu sayede kesme bölgesinde daha düşük sürtünme, daha az aşınma ve daha iyi yüzey kalitesi elde edilir.

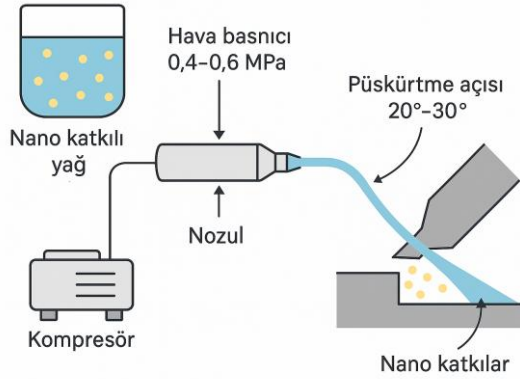


Şekil 3. Nano katkılarının hazırlanma süreci.

3.4. Nano Katkılı MMY Sisteminin Uygulama Prensipleri

Nano-MMY sistemleri en az miktarda soğutma/yağlama yaparak çevreci bir yaklaşım sunmaktadır. Sistem bileşenleri nano katkılı yağ deposu, basınçlı hava kaynağı (kompresör), MMY ünitesi, akış kontrol valfleri ve püskürtme nozulundan oluşmaktadır. Yağ deposu nano karışımın muhafaza edildiği bölümdür. Burada bulunan karışım basınçlı hava yoluyla MMY ünitesine aktarılır. Burada hava ve yağ mikro damlacıklar halinde karışarak, kontrollü bir debiyle nozula yönlendirilir. Nozuldan çıkan karışım kesme bölgesine 20-°30-45° açıyla püskürtülür. Burada püskürtme açısı ve nozulun geometrisi yapılan işin hassasiyetine göre değişiklik gösterir. Püskürtülen karışım sayesinde yüzey üzerinde ince bir yağ filmi oluşur. Bu film tabakası hem sürtünmeyi azaltır hem de talaşın yüzeyden düzgün şekilde uzaklaşmasını sağlar. Sistemin verimlilik parametrelerinden bir tanesi de yağ ve hava debilerinin doğru ayarlanmasıdır. Genel olarak yağ debisi 30–100 mL/saat, hava basıncı ise 0.4–0.6 MPa aralığında seçilir. Yağ debisinin düşük olması sonucunda kesme bölgesine yeterli kadar yağ ulaşamaz. Eğer debi yüksek olursa enerji kaybı ve sis yoğunluğu problemleri yaşanabilir. Bu nedenle optimum değer mevcut koşullara göre deneysel olarak belirlenir. Kompresörün kapasitesine göre çıkan havayı kontrol etmek için basınç kontrol valfleri sıkça kullanılmaktadır. Nano katkılı sistemlerde partikül varlığı yağın reolojik özelliklerini değiştirir. Bu sebeple akış hattında vizkozite artışı gözlemlenebilir. Hava-yağ karışımının düzgün taşınması için hortum çap ve uzunlukları ile nozul geometrisi buna göre seçilmelidir. Nozul konumu kesme parametrelerini doğrudan etkileyen önemli bir parametredir. Yukarıda bahsedilen nozul konum açısı hem kesme bölgesine doğrudan temas sağlar hem de talaşın akış yönünü bozmadır. Bu açı doğru ayarlanmadığında operatör gereğinden fazla yağ sisine maruz kalabilir. Nozulun çok dik konumlandırılması (örneğin 60° üzeri) yağın dağılmasına ve kesme bölgesine ulaşmadan buharlaşmasına neden olabilir. Genellikle püskürtme uzaklığının 20-60 mm aralığında olması önerilmektedir (Neo, Wu, Tan, & Zhou, 2022). Daha yakın mesafelerde püskürtme dar bir bölgeye yoğunlaşırken uzak mesafelerde yağ sisi dağılır ve etkinlik azalır. Nano katkıların MMY sisteminde entegrasyonu klasik MMY uygulamalarına göre önemli avantajlar sağlar. Nano partiküller yağ filmi içinde mikro rulman etkisi oluşturarak sürtünmeyi azaltır. Ayrıca sahip oldukları yüksek ısıl iletkenlik sayesinde kesme bölgesinde oluşan sıcaklığın hızlıca uzaklaştırılmasını sağlarlar. Lamelli yapıli katkıları (örneğin MoS₂ ve h-BN) kaygan film oluştururken, metal oksit katkıları (Al₂O₃, TiO₂) yüzey aşınmasını engeller. Bu sayede kesici takımın flank aşınması azalır talaş-kesici temas bölgesi daha kararlı hale gelir ve yüzey pürüzlülüğü değerleri iyileşir. Literatürde nano

katkılı MMY ile klasik MMY karşılaştırıldığında kesme sıcaklığında %10–25, yüzey pürüzlülüğünde ise %20–40 oranında iyileşme sağlandığı rapor edilmiştir (Makhesana vd., 2023). Nano katkılı MMY sistemleri çevresel, ekonomik ve teknik avantajlarıyla ön plana çıkar. Kesme sıvısının en az miktarda kullanımı operatör sağlığı için ciddi avantajlar sunar. Daha güvenli bir çalışma ortamına zemin hazırlar. Bunun yanında kullanılan nano katkılı yağlar geleneksel soğutma sıvılarına kıyasla daha az enerjiyle daha yüksek yüzey kalitesi elde etmeye olanak tanır. Şekil 4’te Nano katkılı MMY sisteminde püskürtme açısı ve akış parametreleri şematik olarak izah edilmiştir.



Şekil 4. Nano katkılı MMY sisteminde püskürtme açısı ve akış parametreleri

Nano katkılı MMY sistemlerinin uygulama prensibi mekanizma olarak basit gibi görünen ancak oldukça hassas bir mühendislik prensibine dayanır. Hava basıncı, yağ debisi, püskürtme açısı ve katkı oranı gibi parametrelerin optimize edilmesiyle hem kesme performansı hem de takım ömrü önemli ölçüde artırılabilir (Qiao vd., 2025). Bu nedenle sistemin tasarımı yalnızca mekanik bileşenler değil aynı zamanda akışkan dinamiği ve triboloji ilkelerinin de birlikte değerlendirilmesini gerektirir. Hazırlanan karışımın kalitesi işlem verimliliğinde önemli bir parametre olmasının yanı sıra bu karışımın doğru bir şekilde kesme bölgesine aktarılması da son derece önemlidir. MMY sistemlerinde verimlilik bütün aktarma organlarının doğru seçimi ve doğru etkileşimi ile mümkün hale gelmektedir.

3.5. Nano Katkılı MMY’nin İşleme Performansına Etkileri

Nano katkılı MMY sistemlerinin yüzey pürüzlülüğü başta olmak üzere takım aşınması, kesme sıcaklığı ve enerji tüketimi gibi önemli işlenebilirlik parametrelerine doğrudan etkisi bulunmaktadır.

3.5.1. Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkisi

Nano katkılı MMY sistemlerinde yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerlerinde önemli iyileştirmeler görüldüğü rapor edilmiştir (Jaramillo-Cartagena, López-Galeano, Latorre-Correa, & Agudelo-Suárez, 2021). Nano katkıların sürtünmeyi azalttığı yukarıdaki bölümlerde izah edildiği gibi bu sayede mikro boşluklar/oluklar ve deformasyon azalır. Literatürde Al_2O_3 , TiO_2 ve grafen katkılı yağlarla yapılan çalışmalarda yüzey pürüzlülüğünde %20–50 oranında iyileşme elde edildiği bildirilmektedir (Bai, Li, Dong, & Yin, 2019). Ayrıca bu etki düşük kesme hızlarında daha belirgin hale gelmektedir. Bu durumun nedeni düşük hızlarda yağ filminin bozulmadan kararlılığını koruyabilmesidir.

3.5.2. Takım Aşınması ve Takım Ömrü

Nano katkı kullanımının en önemli etkilerinden biri takım aşınmasını azaltarak takım ömrünü iyileştirmesidir. Nano partiküller kesici takım ile talaş arasındaki temas bölgesinde bir koruyucu (tampon) tabaka oluşturur. Bu tabaka hem sürtünmeyi azaltır hem de mikro kaynaklanma (adhesive wear) ve abrazyon (abrasive wear) aşınma mekanizmalarının oluşmasını bir ölçüde engeller. Bunun yanında nano katkıları kesme bölgesindeki sıcaklık artışını düşürerek kesici takım malzemesinin yumuşamasını engeller. Örneğin Al_2O_3 nanopartikülleri yüksek ısı iletkenlikleri sayesinde ısıyı hızlıca uzaklaştırırken MoS_2 ve WS_2 katkıları yüzeye kimyasal olarak bağlanarak “katı yağlayıcı” etki gösterir. Bu sinerjik etki sonucunda takımın flank aşınması, krater aşınması ve yapışma aşınması türlerinde belirgin azalmalar görülür. Deneysel çalışmalarda nano katkılı MMY kullanımıyla takım ömrünün kuru işleme koşullarına göre %30–70 oranında arttığı rapor edilmiştir (Yıldırım, Sarıkaya, Kıvak, & Şirin, 2019).

3.5.3. Kesme Sıcaklığı ve Enerji Tüketimi Üzerine Etkisi

Kesme sıcaklığı talaşlı imalatla en kritik işleme parametrelerinden birisidir. Nano katkılı MMY sistemlerinde hem soğutma hem de yağlama etkisi eş zamanlı olarak gerçekleştirildiği için kesme bölgesinde daha dengeli bir ısı ortamı oluşmaktadır. Nano partiküllerin ısı iletkenlikleri yüksek olduğundan ısıyı hızlı bir şekilde uzaklaştırır ve sıcaklığın kesici takımda kalmasını engeller. Bu durum enerji tüketiminin azalmasına da katkı sağlar. Oluşan düşük sürtünme direnci ve kesici takımın rahat kesme yapabilmesi tezgâhın toplam enerji ihtiyacını azaltır. Yapılan araştırmalarda nano katkılı MMY sisteminin kuru kesmeye kıyasla enerji tüketiminin %10-30 oranında azalttığını göstermektedir (Makhesana, Patel, & Khanna, 2022). Bu durumda nano katkıların varlığının sistemin enerji verimliliği açısından sürdürülebilir üretime önemli katkılar sağladığını ortaya koymaktadır.

3.5.4. Talaş Oluşumu ve Yüzey Bütünlüğü

Talaş morfolojisi kesme işlemini stabilitesi hakkında önemli ipuçları vermektedir. Nano katkılı MMY kullanıldığında oluşan talaşlar çoğunlukla daha kısa, düzgün kıvrımlı, düşük deformasyona sahip ve parlak yüzeyli oluşur. Bu durumun nedeni oluşan yağ filmi sayesinde talaşın kesici takım yüzeyine daha az yapışması ve kolayca uzaklaşmasıdır. Özellikle grafen ve MoS₂ katkılı yağlar talaşın yüzeyden “kayarak” ayrılmasını sağlar. Nano katkılar kesme mekanizmasına pozitif etki ettiğinden çıkan talaşlar zorlanmadan kesme bölgesinden ayrılır. Ayrıca işlenen yüzeylerde mikroyapısal deformasyonlar azalarak yüzey bütünlüğü korunur. Literatürde sunulan bazı SEM görüntüleri incelendiğinde nano katkılı yağlama altında işlenen yüzeylerde mikro çatlak, yırtılma ve yanma izlerinin önemli ölçüde azaldığı görülmektedir (D. Wu vd., 2019). Böylece yüzeyde hem estetik hem de fonksiyonel iyileşme sağlanmaktadır. Sonuç olarak Nano katkılı MMY sistemleri mevcut talaşlı imalat süreçlerinde performans ve sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

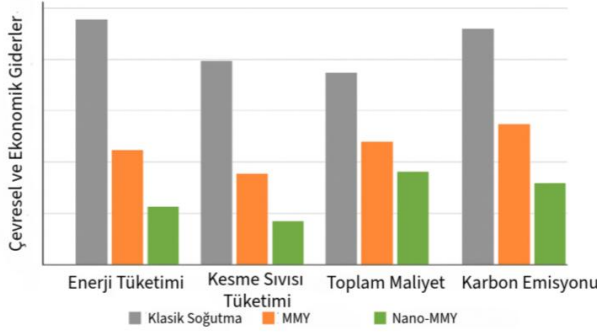
3.6. Çevresel ve Ekonomik Değerlendirme

Nano-MMY sistemleri yalnızca kesme performansını iyileştirmekle kalmayıp aynı zamanda ekonomik verimlilik açısından da önemli avantajlar sunmaktadır. Geleneksel soğutma/yağlama yöntemlerinde kullanılan yüksek miktardaki kesme sıvıları enerji tüketimi ve atık yönetimi açısından ciddi çevre sorunları oluşturmaktadır. Bu nedenle son yıllarda “yeşil imalat” ve “eko verimli üretim” kavramları imalat sektörünün öncelikli hedefleri arasında yer almaktadır. Bu noktada Nano-MMY sistemleri bu hedeflerle büyük ölçüde uyum sağlayabilen yenilikçi bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Sistemde kullanılan yağ miktarının düşük olması (geleneksel yöntemlere göre %90-95 oranında sıvı tasarrufu) işleme maliyeti ve çevre kirliliği açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Geleneksel kesme sıvıları içerdiği kimyasal katkılar (örneğin klor, sülfür veya bor bileşikleri) nedeniyle doğaya karıştıklarında ciddi kirlilik oluşturur. Ayrıca bu sıvıların depolanması, filtrasyonu ve uzaklaştırılması belirli bir enerji ve iş gücü gerektirir. Nano katkılı MMY sistemleri bu olumsuz etkilerin ortadan kaldırılmasına yardımcı olur çünkü sistem neredeyse yağsız veya çok az yağlı çalıştığından atık kesme sıvısı oluşumu sıfıra yaklaşır. Bunun yanı sıra nano katkılı yağların çoğu bitkisel esaslı taşıyıcı yağlarla hazırlanır. Bu tür yağlar biyolojik olarak parçalanabilir toksit etkileri düşüktür ve insan sağlığı açısından güvenlidir. Operatörlerin solunum yollarına zarar verebilen klasik soğutma sistemlerinin aksine nano katkılı MMY sistemleri çok daha temiz bir çalışma ortamı sağlar. Enerji verimliliği açısından da sistem oldukça avantajlıdır. Düşük sürtünme ve sıcaklık nedeniyle kesme kuvvetlerinde azalma görülür bu durum da tezgâh

motorlarının enerji tüketimini %10-20 oranında düşürür (Muthuswamy, 2025). Böylece hem karbon ayak izi ölçülür hem de üretim maliyetlerine bağlı enerji tüketimi giderek azalma eğilimine girer. Ekonomik değerlendirme açısından bakıldığında nano katkılı MMY sistemleri klasik soğutma yöntemlerine göre biraz daha fazla ekipman maliyetine sahip olabilir (örneğin nozul sistemleri, karıştırıcılar vd.) fakat toplam sahip olma maliyeti dikkate alındığında sistemin uzun vadede çok daha avantajlı olduğu görülmektedir. Bu durum temel nedenleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Enerji tüketiminin azalmasına bağlı tezgâh motorunun yükünün azalması.
- Takım ömrünün uzaması ve buna bağlı takım değiştirme sıklığı ve stok maliyetlerinin azalması.
- Kesme sıvısının tüketiminin azalması ile yağ ve filtre maliyetlerinde düşüş görülmesi.
- İş parçasının kalitesinin artmasıyla beraber yeniden işleme maliyetlerinin düşürülmesi

Yapılan ekonomik analiz ve çalışmalarda nano katkılı MMY sistemlerinin klasik soğutma sistemlerine göre toplam üretim maliyetlerini %15-30 oranında azalttığı bildirilmiştir (Haq vd., 2021). Özellikle yüksek takım maliyetine sahip sert malzemelerin işlenmesinde bu fark daha da belirgin hale gelmektedir. Nanoteknoloji alanındaki gelişmeler sayesinde nano katkıların üretim ve hazırlama maliyetleri de zamanla azalmaktadır. Şekil 5'te çevresel ve ekonomik karşılaştırmayı içeren bir grafik verilmiştir. Nano katkılı MMY sistemleri enerji verimliliği ve kaynak tasarrufu sağlaması avantajıyla sürdürülebilir üretim teknolojileri sınıfında değerlendirilmektedir. Bu sistem üç temel sürdürülebilirlik ilkesini karşılar: Ekonomik sürdürülebilirlik, çevresel sürdürülebilirlik ve sosyal sürdürülebilirlik. Bu sistemin yaygınlaşması ve erişilebilir olması yalnızca üretim verimliliğini değil bununla beraber endüstriyel çevre yönetimi anlayışını da ileri bir seviyeye taşımaktadır.

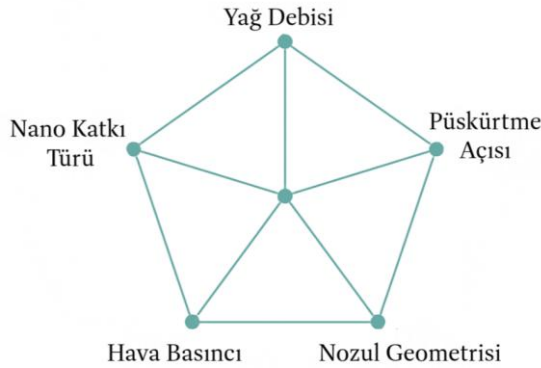


Şekil 5. Klasik soğutma, MMY ve Nano-MMY sistemlerinin çevresel ve ekonomik giderleri.

4. Nano Katkılı MMY Sistemlerinin Performans Analizi ve Optimizasyonu

Nano katkılı minimum miktarda yağlama sistemlerinin performans analizi bu yöntemin sadece tribolojik yönüyle değil aynı zamanda enerji, maliyet ve çevresel boyutlarda da sağladığı bütüncül avantajların ortaya konması açısından önem arz etmektedir. Deneysel çalışmalar nano-MMY sistemlerinin özellikle yüksek sıcaklıklı işleme koşullarında klasik MMY ve kuru kesmeye göre üstün performans sergilediğini ortaya koymaktadır. Buradan yola çıkarak performans analizi kapsamında takım aşınmasının da önemli bir kriter olduğunu belirtmek gereklidir. Nano katkılı MMY sistemlerinde kesici takım ömrünün uzaması yalnızca termal yükün azalmasıyla değil aynı zamanda nanopartiküllerin yüzeyde oluşturduğu mikro film tabakasının aşınma mekanizmalarını sınırlamasıyla da ilişkilidir. Bu tabaka takım yüzeyinde mikro düzeyde bir bariyer oluşturarak hem yapışma (adhesive) hem de abrazyon (abrasive) aşınmayı azaltmaktadır. Literatürde nano katkılı sistemlerde flank aşınmasının kuru kesmeye göre %40–60, klasik MMY’ye göre ise yaklaşık %25 oranında azaldığı bildirilmiştir (Jadam, Rakesh, & Datta, 2020). Bu durum kesici takım maliyetlerinde önemli bir tasarruf sağlamaktadır. Enerji tüketimi noktasında genel bir değerlendirme yapılırsa nano-MMY sistemlerinin kesme direncini düşürmesi tezgâh motorlarının güç ihtiyacını azaltır. Azalan sürtünmeyle de beraber kesme kuvvetleri azalır ve enerji verimliliği artar. Bu durum yalnızca ekonomik değil aynı zamanda da çevresel sürdürülebilirlik açısından önemlidir. Enerji tüketimini düşmesi daha az karbon salınımı anlamına gelmektedir. Nano katkıların optimizasyonu yalnızca deneysel yaklaşımlarla değil istatistiksel ve veri tabanlı yöntemlerle de desteklenmektedir. Taguchi ve GRA gibi çok kriterli karar verme yöntemleri farklı performans parametrelerini aynı anda değerlendirerek en uygun kombinasyonları seçme olanağı sağlar. Bununla beraber yapay zekâ ve makine öğrenmesi tabanlı

modeller kullanılarak yüzey pürüzlülüğü, aşınma ve enerji tüketimi gibi çıktılar yüksek doğrulukta tahmin edilebilmektedir. Bu tür modellemeler gelecekte nano-MMY sistemlerinin akıllı üretim ortamlarına entegrasyonu açısından umut vaat etmektedir. Sonuç olarak nano-MMY sistemlerinin gösterge analizi ve optimizasyonu yalnızca teknik bir konu değil aynı zamanda çevresel ve ekonomik boyutları olan bütünsel bir konudur. Doğru katkı seçiminden uygun karıştırma oranına nozulun açısından geometrisine kadar birlikte değerlendirilmesi gereken bir sistemdir. Şekil 6'da nano-MMY sistemlerinde optimizasyon parametrelerinin etkileşimi şematik olarak verilmiştir. Burada unutulmaması gereken en önemli noktalardan birisi bu tür sistemlerin işleme verimliliğine etkisinin görüldüğünden daha detaylı olmasıdır. Mikro ölçekte bulunan küçük partiküllerin işlenebilirliği zahmetli ve maliyetli üretim süreçlerine doğrudan etkisi vardır. Bir nevi yapılan işin kalitesi doğru ve ekonomik yağlamayla mümkündür.



Şekil 6. Nano-MMY sistemlerinde optimizasyon parametreleri.

5. Genel Değerlendirme

Bu bölümde talaşlı imalat sürecinde çevreci, ekonomik ve yüksek performanslı bir alternatif olarak öne çıkan Nano-MMY sistemleri bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmiştir. Nano katkıların kesme bölgesinde sürtünme, sıcaklık, takım aşınması ve yüzey kalitesi üzerindeki etkileri deneysel, teorik ve uygulama yönleriyle ele alınmıştır. Sistemin performansı hem teknik hem de çevresel bakımdan analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular nano-MMY sistemlerinin klasik soğutma sistemlerine kıyasla çok daha az sıvı tüketimiyle daha yüksek yüzey kalitesi ve daha iyileştirilmiş takım ömrü sağladığını ortaya koymaktadır. Genel olarak nano-MMY sistemlerinin en belirgin avantajları aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

- Çalışma ortamında yağ buharı gibi zararlı sıvıların azalması ya da ortadan kalkması
- Kesme sıcaklığının uzaklaştırılmasında minimum yağ kullanımı
- Takım ömrünün uzamasıyla beraber üretim maliyetlerinin azalması
- Enerji tüketiminin optimizasyonu ve çevre dostu yeşil üretim olanağı

Sistemin sahip olduğu bu avantajlara rağmen geniş ölçekli endüstriyel uygulamalarda halen teknik zorluklar yaşanmaktadır. Bu zorlukların başında nano partiküllerin dağılım kararlılığı, karıştırma işleminin yeteri kadar besleyici olmaması ve bu durumun akabinde nozul tıkanmaları görülmektedir. Bu tür problemlerin çözümü için gelecekte yüzey aktif madde optimizasyonu ve akıllı sensör tabanlı püskürtme kontrolü gibi yenilikçi yaklaşımların kullanılması öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- Ahmadi, M. H., Ghazvini, M., Alhuyi Nazari, M., Ahmadi, M. A., Pourfayaz, F., Lorenzini, G., & Ming, T. (2019). Renewable energy harvesting with the application of nanotechnology: A review. *International Journal of Energy Research*, 43(4), 1387–1410.
- Bai, X., Li, C., Dong, L., & Yin, Q. (2019). Experimental evaluation of the lubrication performances of different nanofluids for minimum quantity lubrication (MQL) in milling Ti-6Al-4V. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101(9), 2621–2632.
- Haq, M. A. ul, Hussain, S., Ali, M. A., Farooq, M. U., Mufti, N. A., Pruncu, C. I., & Wasim, A. (2021). Evaluating the effects of nano-fluids based MQL milling of IN718 associated to sustainable productions. *Journal of Cleaner Production*, 310, 127463.
- Jadam, T., Rakesh, M., & Datta, S. (2020). Machinability of Ti-6Al-4V Superalloy: Performance of Dry Cutting and Nanofluid MQL (MWCNT-Added Rice Bran Oil). *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(7), 5673–5695.
- Jaramillo-Cartagena, R., López-Galeano, E. J., Latorre-Correa, F., & Agudelo-Suárez, A. A. (2021). Effect of Polishing Systems on the Surface Roughness of Nano-Hybrid and Nano-Filling Composite Resins: A Systematic Review. *Dentistry Journal*, Vol. 9.
- Makhesana, M. A., Patel, K. M., & Bagga, P. J. (2022). Evaluation of Surface Roughness, Tool Wear and Chip Morphology during Machining of Nickel-Based Alloy under Sustainable Hybrid Nanofluid-MQL Strategy. *Lubricants*, Vol. 10.
- Makhesana, M. A., Patel, K. M., & Khanna, N. (2022). Analysis of vegetable oil-based nano-lubricant technique for improving machinability of Inconel 690. *Journal of Manufacturing Processes*, 77, 708–721.
- Makhesana, M. A., Patel, K. M., Krolczyk, G. M., Danish, M., Singla, A. K., & Khanna, N. (2023). Influence of MoS₂ and graphite-reinforced nanofluid-MQL on surface roughness, tool wear, cutting temperature and microhardness in machining of Inconel 625. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 41, 225–238.
- Mousavi, S. B., Heris, S. Z., & Estellé, P. (2020). Experimental comparison between ZnO and MoS₂ nanoparticles as additives on performance of diesel oil-based nano lubricant. *Scientific Reports*, 10(1), 5813.
- Muthuswamy, P. (2025). Comparison of machining forces, power consumption, and specific cutting energy in tools with grooved cutting edges for sustainable

- manufacturing. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 11(3), 1922–1936.
- Neo, R. G., Wu, K., Tan, S. C., & Zhou, W. (2022). Effect of Spray Distance and Powder Feed Rate on Particle Velocity in Cold Spray Processes. *Metals*, Vol. 12.
- Qiao, G., Xiong, X., Yang, J., Zhen, D., Zhang, F., & Wei, Y. (2025). Numerical and experimental analysis for the effect of oil mist flow characteristics on the penetration and lubrication performance in MQL milling. *Journal of Manufacturing Processes*, 134, 603–618.
- Wu, D., Zhang, D., Ye, Y., Ma, L., Minhas, B., Liu, B., ... Li, X. (2019). Durable lubricant-infused anodic aluminum oxide surfaces with high-aspect-ratio nanochannels. *Chemical Engineering Journal*, 368, 138–147.
- Wu, H., Zhao, J., Xia, W., Cheng, X., He, A., Yun, J. H., ... Jiang, Z. (2017). A study of the tribological behaviour of TiO₂ nano-additive water-based lubricants. *Tribology International*, 109, 398–408.
- Wu, J., Li, C., Hailatihan, B., Mi, L., Baheti, Y., & Yan, Y. (2022). Effect of the Addition of Thermoplastic Resin and Composite on Mechanical and Thermal Properties of Epoxy Resin. *Polymers*, Vol. 14.
- Xu, X., Wu, Q., Pang, Y., Cao, Y., Fang, Y., Huang, G., & Cao, C. (2022). Multifunctional Metamaterials for Energy Harvesting and Vibration Control. *Advanced Functional Materials*, 32(7), 2107896.
- Yıldırım, Ç. V., Sarıkaya, M., Kıvak, T., & Şirin, Ş. (2019). The effect of addition of hBN nanoparticles to nanofluid-MQL on tool wear patterns, tool life, roughness and temperature in turning of Ni-based Inconel 625. *Tribology International*, 134, 443–456.



BÖLÜM 16

Ar-Ge ve Dijital Dönüşüm

Elifcan Göçmen Polat¹ & Andaç İmak² & Ceren Ünlükal³

1. Giriş

Günümüzde teknolojik yenilikler ve dijital dönüşüm, araştırma-geliştirme (Ar-Ge) faaliyetlerini yeniden tanımlamakta ve bu faaliyetlere sürdürülebilirlik boyutu kazandırmaktadır. Özellikle “ikiz dönüşüm” olarak adlandırılan yeşil ve dijital dönüşüm süreçleri, endüstriyel gelişimin en önemli itici güçleri arasında yer almakta; bu süreçte Ar-Ge’nin stratejik rolü daha da belirgin hale gelmektedir (European Commission, 2022).

Dijital çağın getirdiği veri yoğunluğu, mühendislik ve üretim sistemlerinde Ar-Ge’nin önemini arttırmıştır. Günümüzde her gün milyarlarca veri üretilmekte ve bu veriler, üretim süreçlerinden müşteri deneyimlerine kadar çok geniş bir yelpazede analiz edilerek rekabet avantajı yaratmaktadır (Manyika vd., 2011).

Bu bölümün amacı, Ar-Ge’nin mühendislik perspektifinden değerlendirilmesi, tarihsel gelişiminin incelenmesi ve dijital dönüşüm sürecine olan etkilerinin analiz edilmesidir.

2. Ar-Ge’nin Tanımı ve Önemi

Frascati Kılavuzu’na göre araştırma-geliştirme (Ar-Ge), “insan, kültür ve toplum bilgisinin artırılması ve bu bilginin yeni uygulamalar tasarlamak için sistematik olarak kullanılması amacıyla yürütülen yaratıcı çalışmalar” olarak tanımlanmaktadır (OECD, 2015).

Mühendislik alanında Ar-Ge; sistemlerin, süreçlerin, ürünlerin veya hizmetlerin daha verimli ve yenilikçi hale getirilmesini amaçlayan bilimsel ve teknolojik faaliyetleri kapsamaktadır (Tassey, 2014). Ar-Ge, üretim süreçlerinin iyileştirilmesi, maliyetlerin düşürülmesi, kalite standartlarının yükseltilmesi ve işletmelerin rekabet gücünün artırılması gibi hedeflere ulaşmada kilit rol oynar (Gokhberg & Meissner, 2013).

Teknolojik gelişmelerin hızla arttığı günümüzde, işletmelerin sürdürülebilir büyüme sağlamaları için Ar-Ge yatırımları stratejik bir zorunluluk haline gelmiştir. Ar-Ge faaliyetleri; süreç verimliliğini arttırarak kaynakların etkin

¹ Doç. Dr., Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Tunceli, Türkiye, ORCID: 0000-0002-0316-281X

² Dr. Öğr. Üyesi, Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Tunceli, Türkiye, ORCID: 0000-0002-3654-040X

³ Arş. Gör. Dr., Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Tunceli, Türkiye, ORCID: 0000-0001-9997-7310

kullanımını sağlamakta, aynı zamanda yenilikçi ürün ve hizmetlerin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır (Hagedoorn & Cloudt, 2003). Bu sayede işletmeler hem müşteri memnuniyetini arttırmakta hem de çevre dostu ve sürdürülebilir teknolojilere yönelerek uzun vadeli ekonomik ve çevresel faydalar elde etmektedir.

3. Ar-Ge'nin Tarihçesi

Mühendislik bağlamında Ar-Ge'nin gelişimi, sanayi devrimiyle birlikte üretim sistemlerinde yaşanan dönüşümlerle paralel ilerlemiştir. 19. yüzyılın sonlarında ortaya çıkan sistematik üretim anlayışı, bilimsel yöntemlerin uygulanmasıyla desteklenmiştir. Frederick W. Taylor'ın bilimsel yönetim ilkeleri, Ar-Ge'nin mühendislikte temel yapı taşlarından biri olarak kabul edilir. Taylor, iş süreçlerinin ölçülebilir ve analiz edilebilir biçimde incelenmesi gerektiğini savunarak, üretim verimliliğini arttırmak için sistematik Ar-Ge uygulamalarının önünü açmıştır (Taylor, 1911).

20. yüzyılın ilk yarısında Henry Ford'un seri üretim sistemi, üretimde ölçek ekonomisini mümkün kılarak Ar-Ge'nin endüstriyel süreçlerdeki önemini daha da artırmıştır (Hounshell, 1984). II. Dünya Savaşı sonrasında ise rekabetin küreselleşmesiyle birlikte Ar-Ge, stratejik bir yönetim aracı haline gelmiş; özellikle ABD ve Japonya'daki üretim firmaları süreç iyileştirme ve kalite kontrol alanlarında Ar-Ge yatırımlarını yoğunlaştırmıştır (Nelson & Winter, 1982).

1950'lerden itibaren toplam kalite yönetimi, yalın üretim ve sürekli iyileştirme yaklaşımları Ar-Ge'nin kapsamını genişletmiştir. Günümüzde ise yapay zekâ, nesnelerin interneti (IoT), büyük veri analitiği ve dijital ikiz teknolojileri Ar-Ge'nin yeni yönünü belirlemekte; işletmelere çevik, esnek ve sürdürülebilir çözümler geliştirme olanağı sunmaktadır (Lee vd., 2015).

Ar-Ge mühendislik disiplininin temel taşlarından biri olarak, dijital dönüşüm çağında işletmelerin yenilik kapasitesini ve rekabet avantajını sürdürülebilir kılmaktadır.

4. Ar-Ge'nin Çeşitli Sektörler Üzerine ve Topluma Katkıları

Ar-Ge faaliyetleri, mühendislik disiplinlerinin tamamında ekonomik büyümenin, rekabet gücünün ve toplumsal refahın temel belirleyicilerinden biri olarak kabul edilmektedir. Ar-Ge çalışmaları sayesinde yeni teknolojiler geliştirilmekte, mevcut üretim ve hizmet süreçleri iyileştirilmekte, bu da verimlilik artışı ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine katkı sağlamaktadır (OECD, 2015). Gelişmiş ülkelerin inovasyon politikaları incelendiğinde, Ar-Ge yatırımlarının yalnızca ekonomik kazançla sınırlı olmadığı; çevresel sürdürülebilirlik, toplumsal sağlık, dijital dönüşüm ve yaşam kalitesinin

arttırılması gibi alanlarda da önemli etkiler yarattığı görülmektedir (European Commission, 2020).

Sanayi sektöründe Ar-Ge faaliyetleri, üretim süreçlerinin optimize edilmesini, enerji verimliliğinin arttırılmasını ve çevresel etkilerin azaltılmasını sağlamaktadır. Özellikle üretim teknolojilerinin dijitalleşmesi, otomasyon sistemlerinin entegrasyonu ve akıllı fabrika uygulamaları, Endüstri 4.0 paradigması altında yeniden biçimlenmiştir (Kang vd., 2016).

Otomotiv sektöründe Ar-Ge yatırımları sayesinde yüksek verimli motorlar, elektrikli ve hibrit araçlar, düşük emisyon teknolojileri geliştirilmiş; bu sayede hem çevreye duyarlı üretim modelleri hem de sürdürülebilir ulaşım çözümleri ortaya çıkmıştır (Bohnsack vd., 2014). Benzer şekilde, havacılık sektöründe yürütülen mühendislik odaklı Ar-Ge çalışmalarıyla yakıt tasarrufu sağlayan, daha güvenli ve sessiz uçaklar üretilmekte; karbon ayak izi azaltılmaktadır (Airbus, 2023).

Hizmet sektöründe Ar-Ge, dijitalleşme süreciyle birlikte hızla dönüşmüştür. Bankacılık, finans, e-ticaret ve lojistik gibi alanlarda Ar-Ge faaliyetleri, güvenli veri işleme altyapılarının kurulması, yapay zeka destekli müşteri hizmetlerinin geliştirilmesi ve süreçlerin otomasyonu gibi yenilikçi uygulamalara öncülük etmektedir (Smit vd., 2020). Bu teknolojik gelişmeler, hizmet kalitesini arttırmakla kalmayıp müşteri memnuniyetini ve erişilebilirliği de önemli ölçüde yükseltmektedir.

Sağlık sektöründe Ar-Ge, hem bireysel hem de toplumsal refahın arttırılmasında kritik bir role sahiptir. Tıbbi cihazların, ilaçların, tanı ve tedavi yöntemlerinin geliştirilmesinde yürütülen Ar-Ge çalışmaları, hasta bakım kalitesini ve tedavi etkinliğini doğrudan etkilemektedir (Imran vd., 2021). Biyoteknoloji, nanoteknoloji ve genetik mühendisliği alanlarındaki Ar-Ge uygulamaları sayesinde kişiye özel tedavi (personalized medicine) yaklaşımları geliştirilmektedir (Brothers & Rothstein, 2015). Bu gelişmeler, sağlıkta dijital dönüşümün de temelini oluşturarak büyük veri, yapay zeka ve tele-tıp sistemlerinin yaygın kullanımını mümkün kılmaktadır (Gür & Eren, 2023).

Sağlık sektöründe araştırma geliştirme uygulamaları yürütülürken, bu alanda iş birliği yürütülebilecek kuruluşlar (Tablo 1) ve öncelikli alanlar (Tablo 2) aşağıda verilmektedir:

Tablo 1. Sağlık sektöründe Ar-Ge iş birliğindeki kuruluşlar

Organizasyon adı	Web sitesi
Türkiye Sağlık Enstitüleri Başkanlığı (TÜSEB)	https://www.tuseb.gov.tr/
TÜBİTAK	https://tubitak.gov.tr/tr
T.C. Sağlık Bakanlığı	https://www.saglik.gov.tr/

Tablo 2. Sağlık sektöründe Ar-Ge öncelikli alanlar

Öncelikli Ar-Ge konusu	Tavsiye Edilen Ar-Ge ve Yenilik İş Birliği/Modeli
Teşhisi zor hastalıklar	Kamu – Özel Sektör ve Üniversite İş Birliği
Yardımcı sağlık uygulamaları	Hastaneler, Üniversiteler, Kamu Araştırma Enstitüleri/Merkezleri, Büyük Ölçekli Sanayi Kuruluşları, KOBİ’ler, Teknopark Firmaları
İlaç geliştirme	Büyük Ölçekli İlaç Firmaları, Teknopark Firmaları, Üniversiteler, Kamu Araştırma Enstitüleri/Merkezleri
Bulaşıcı hastalık tespiti	Uluslararası Kuruluşlar, Üniversiteler, Özel Sektör

Sağlık alanındaki Ar-Ge faaliyetlerinin etkinliğini artırmak amacıyla çeşitli kurumlar arasında iş birlikleri kurulmaktadır. Türkiye’de bu alanda öncü kuruluşlar arasında Türkiye Sağlık Enstitüleri Başkanlığı (TÜSEB), TÜBİTAK ve T.C. Sağlık Bakanlığı yer almaktadır. Bu kurumlar, ilaç geliştirme, teşhis sistemleri ve biyomedikal teknolojiler gibi öncelikli alanlarda kamu, özel sektör ve üniversiteler arasında iş birliği modellerini desteklemektedir (TÜSEB, 2024; TÜBİTAK, 2024).

Özellikle teşhisi zor hastalıkların tanısında kamu–özel sektör iş birlikleri; yardımcı sağlık teknolojilerinde ise teknopark firmaları, üniversiteler ve KOBİ’lerin Ar-Ge merkezleriyle entegre çalışması önerilmektedir. Böylece hem araştırma çıktılarının ticarileşmesi hem de toplum sağlığının iyileştirilmesi hedeflenmektedir (World Health Organization, 2022).

Ar-Ge’nin toplumsal etkileri yalnızca ekonomik büyüme ile sınırlı değildir. Eğitim, çevre, sağlık ve enerji gibi temel alanlarda geliştirilen yenilikler, toplumun yaşam kalitesini doğrudan etkilemektedir. Özellikle mühendislik temelli Ar-Ge projeleri, yenilenebilir enerji teknolojileri, su tasarrufu sistemleri ve akıllı şehir altyapıları aracılığıyla sürdürülebilir kalkınma hedeflerine katkı sunmaktadır (United Nations, 2020). Dolayısıyla Ar-Ge, yalnızca teknolojik ilerlemenin değil, aynı zamanda sosyal refahın, çevresel dengenin ve dijital adaletin de temel taşıdır.

5. AR-GE’nin Temel İlkeleri: Yenilikçilik ve Teknolojik Gelişim

Ar-Ge faaliyetlerinin temelinde yenilikçilik ve teknolojik gelişim kavramları yer almaktadır. Bu iki unsur, mühendislik disiplinlerinde sürdürülebilir kalkınmanın ve rekabet avantajının itici gücünü oluşturmaktadır. Yenilikçilik,

mevcut sistemleri, süreçleri veya ürünleri geliştirmeyi ya da tamamen yeni çözümler üretmeyi amaçlarken; teknolojik gelişim, bu yeniliklerin uygulanabilmesini sağlayan araç, yöntem ve altyapıların oluşturulmasını ifade eder (Özel & Öztemel, 2018).

Mühendislikte yenilikçilik, üretimden hizmet sektörüne kadar uzanan geniş bir yelpazede süreçlerin sürekli iyileştirilmesini hedefler. Üretim sistemleri, lojistik süreçleri, kalite kontrol mekanizmaları ve insan kaynakları yönetimi gibi alanlarda yeni yöntemlerin geliştirilmesi, kurumlara maliyet avantajı, yüksek verimlilik ve esneklik kazandırmaktadır (Sağbaş & Gülseren, 2019). Özellikle yalın üretim, Altı Sigma ve toplam kalite yönetimi gibi yaklaşımlar, yenilikçi mühendislik çözümlerinin sistematik biçimde uygulanmasına olanak tanımıştır.

Teknolojik gelişim, bu yenilikçi uygulamaların altyapısını oluşturur. Otomasyon, robotik sistemler, yapay zeka ve makine öğrenmesi gibi teknolojiler, mühendislik süreçlerinde devrim niteliğinde dönüşümler yaratmaktadır. Bu teknolojiler, verimliliği arttırmak, insan hatasını azaltmak ve veriye dayalı karar alma süreçlerini güçlendirmek için kullanılmaktadır (Doğan & Arslantekin, 2016). Büyük veri analitiği ve karar destek sistemleri, mühendislerin karmaşık sistemleri daha etkin biçimde yönetmesini sağlamaktadır.

Günümüzde mühendislik uygulamaları, Endüstri 4.0 devriminin sunduğu teknolojik altyapılardan yoğun biçimde yararlanmaktadır. Bu devrim; siber-fiziksel sistemler (CPS), nesnelerin interneti (IoT), büyük veri, artırılmış gerçeklik (AR) ve bulut bilişim gibi teknolojileri kapsamakta, insan-makine entegrasyonunu en üst düzeye çıkarmaktadır (Zeng vd., 2020). CPS sistemleri sensörler aracılığıyla fiziksel dünyadan veri toplayarak dijital ortama aktarmakta, IoT sistemleri ise cihazlar arasında etkileşim sağlayarak süreçleri gerçek zamanlı izlenebilir hale getirmektedir (Obitko vd., 2013).

Ayrıca, RFID (Radyo Frekansı Tanımlama) ve GPS (Küresel Konumlandırma Sistemi) teknolojilerinin entegrasyonu sayesinde hem iç hem dış mekanlarda nesne ve yük takibi sağlanmakta, tedarik zinciri yönetimi süreçleri optimize edilmektedir (Sanders vd., 2016). Bu teknolojiler, kaynakların verimli kullanımını destekleyerek sürdürülebilir üretim hedeflerine katkı sunmaktadır.

Dijital dönüşümün uygulanabilirliği, birçok sektörde olduğu gibi mühendislik alanında da Ar-Ge yatırımlarının etkinliğine bağlıdır. Özellikle sağlık, enerji, imalat ve lojistik gibi sektörlerde dijital dönüşümün hız kazanabilmesi için dijital teknolojilere, veri analitiğine ve yenilikçi Ar-Ge projelerine odaklanılması gerekmektedir. Bu çerçevede Ar-Ge faaliyetleri, sadece teknoloji üretimini değil, aynı zamanda bu teknolojilerin ekonomik, çevresel ve toplumsal sürdürülebilirlik hedefleriyle entegrasyonunu da içermektedir (Chen & Xing, 2015).

Ar-Ge'nin temel ilkeleri olan yenilikçilik ve teknolojik gelişim, mühendisliğin dönüşümünü yönlendiren iki ana eksenidir. Bu iki kavramın entegrasyonu hem üretim hem de hizmet sektörlerinde dijital dönüşümü hızlandırmakta, mühendislik sistemlerinin daha akıllı, esnek ve sürdürülebilir hale gelmesini sağlamaktadır.

6. Dijital Dönüşüm ve Kavramsal Çerçevesinin Analizi

Dijital dönüşüm, günümüz mühendislik dünyasında yalnızca teknolojik bir değişimi değil, aynı zamanda örgütsel, kültürel ve stratejik bir dönüşümü de ifade etmektedir. Bu kavramı doğru anlamak için üç temel terim birbirinden ayırt edilmelidir: dijitalleştirme (digitization), dijitalleşme (digitalization) ve dijital dönüşüm (digital transformation) (Rose vd., 2016). Her biri farklı bir kapsamı temsil ederken, yanlış biçimde birbirlerinin yerine kullanılabilmektedir.

6.1. Dijitalleştirme (Digitization)

Dijitalleştirme, analog bilgilerin sayısal forma dönüştürülmesi sürecidir. Başka bir ifadeyle, fiziksel veya manuel olarak tutulan bilgilerin bilgisayar ortamına aktarılması anlamına gelir. Bu süreç, analogdan dijitalle geçişin ilk adımıdır ve veri depolama, işleme ve iletim açısından büyük kolaylıklar sağlar (Loebbecke & Picot, 2015). Örneğin bir mühendislik işletmesinde üretim verilerinin manuel kayıt defterlerinden bilgisayar sistemlerine aktarılması dijitalleştirmedir. Bu dönüşümün en önemli avantajları, maliyetlerin düşürülmesi, veri erişiminin kolaylaşması ve süreçlerin sadeleşmesidir.

6.2. Dijitalleşme (Digitalization)

Dijitalleşme, dijitalleştirilmiş verilerin iş süreçlerinde kullanılmasını ve yönetilmesini ifade eder. Bu aşama, teknolojik araçların iş modellerine entegre edilmesiyle süreçlerin otomasyonunu ve verimliliğini artırır. Dijitalleşme, yalnızca teknoloji kullanımını değil, aynı zamanda işletme süreçlerinde veri temelli karar alma kültürünün yerleşmesini de kapsar (Teichert, 2019).

Mühendislik sektörlerinde dijitalleşme; üretim planlama yazılımları, akıllı sensör sistemleri, robotik otomasyon ve nesnelerin interneti uygulamalarıyla süreçlerin dijital olarak izlenmesini sağlamaktadır. Bu da mühendislik projelerinde hata oranlarını azaltmakta ve sürdürülebilirliği desteklemektedir.

6.3. Dijital Dönüşüm (Digital Transformation)

Dijital dönüşüm, dijitalleşmeden daha geniş bir kavram olup, yalnızca teknolojik araçların kullanımı değil; aynı zamanda kurumsal stratejilerin, organizasyon yapısının ve iş modellerinin köklü biçimde değişimini içerir (Rose vd., 2016).

Mühendislikte dijital dönüşüm, üretimden tedarik zincirine, ürün tasarımından bakım-onarıma kadar tüm aşamaların dijital ekosisteme entegre edilmesini kapsar. Bu süreç, yapay zeka, büyük veri, bulut bilişim, arttırılmış gerçeklik ve siber-fiziksel sistemlerin mühendislik faaliyetlerine dahil edilmesini gerektirir.

6.4. Dijital Dönüşüm Stratejisi

Dijital dönüşümün başarılı olabilmesi için stratejik planlama gereklidir. Kurumların dönüşüm öncesinde mevcut durum analizini yapması, vizyon ve hedeflerini belirlemesi, yetkinliklerini değerlendirmesi ve süreçlerini yeniden yapılandırması gerekir (Rose vd., 2016). Stratejik dönüşüm sürecinde mühendislik işletmeleri, süreç iyileştirmeyi, insan kaynağı eğitimini ve dijital olgunluk değerlendirmelerini birlikte yürütmelidir. Bu bağlamda sürekli iyileştirme yaklaşımı (continuous improvement) dijital dönüşümün sürdürülebilirliğini sağlar.

6.5. Dijital Dönüşümün Yol Haritası ve Olgunluk Modelleri

Dijital dönüşüm yalnızca teknolojik altyapı yatırımıyla değil, dijital olgunluk düzeyi ile de ilişkilidir. Dijital olgunluk, bir işletmenin dijital teknolojileri ne ölçüde benimsediğini ve stratejik düzeyde entegre edebildiğini gösterir (Baki & Serdar, 2020).

İşletmelerin dijital olgunluk seviyelerini değerlendirmek için çeşitli modeller geliştirilmiştir. Bunlardan biri Stratejik Uyumlaşma Olgunluk Modeli (SAMM) olup, bilgi teknolojileri ile kurumsal stratejilerin ne derece uyumlu olduğunu ölçmektedir (Erdağ & Can, 2019). Dijital olgunluk düzeyinin doğru belirlenmesi, firmaların dijital dönüşüm yol haritalarını planlarken güçlü ve zayıf yönlerini fark etmelerine olanak sağlar. Böylelikle firmalar, teknolojik yetkinliklerini stratejik hedeflerle uyumlu hale getirebilir.

Dijital dönüşüm, mühendislik disiplinleri açısından yalnızca teknolojik bir süreç değil, aynı zamanda organizasyonel bir yeniden yapılanmadır. Bu dönüşüm; dijitalleşme, veri temelli karar verme, yenilikçi iş modelleri ve sürekli iyileştirme süreçleriyle desteklendiğinde mühendislik işletmelerine sürdürülebilir rekabet avantajı sağlar.

7. Ar-Ge ve Dijitalleşme Arasındaki Etkileşim

Ar-Ge ile dijital dönüşüm arasındaki etkileşim, mühendislik disiplinlerinde inovasyon ve verimlilik açısından kritik bir rol oynamaktadır. Dijital teknolojiler, Ar-Ge süreçlerinin sürekliliğini, hızını ve çıktı kalitesini arttırırken, Ar-Ge uygulamaları da dijital dönüşüm stratejilerinin etkinliğini belirleyen temel unsurlar haline gelmiştir. Bu karşılıklı ilişki; hem araçsal/taktiksel hem de stratejik/örgütsel boyutlarda kendini göstermektedir.

7.1. Dijital Teknolojilerin Ar-Ge Süreçlerine Etkisi

Dijital teknolojiler Ar-Ge süreçlerini birden fazla yönden dönüştürmektedir. Öncelikle, büyük veri analitiği, yapay zeka ve makine öğrenmesi gibi araçlar deney tasarımı, prototip geliştirme ve test etme aşamalarında daha kısa sürede, daha az kaynakla ve daha yüksek doğrulukla çalışılmasına imkan tanımaktadır. Örneğin otomotiv sektöründe yapılan bir çalışmada dijital dönüşümün ürün Ar-Ge performansını doğrudan iyileştirdiği; yenilik ekosistemi kaynaklarının ve dijital teknoloji yenilik kapasitesinin bu ilişkinin aracı değişkenleri olduğu bulunmuştur (Men vd., 2023).

Ayrıca dijitalleşme, Ar-Ge faaliyetlerinde risk yönetimini de kolaylaştırır. Simülasyonlar, dijital ikizler ve modelleme teknikleri belirli senaryoların önceden sınanmasına olanak verir; bu da beklenmeyen maliyetleri ve geliştirme sürecindeki gecikmeleri azaltır. Bilgi akışı ve teknik personel kapasitesi gibi unsurlar da dijital dönüşümün Ar-Ge çıktılarının kalitesini ve niceliğini arttırmada önemli rol oynar (Chen & Kim, 2023).

Bilimsel araştırmalarda dijitalleşme, iş birliği araçlarının, veri paylaşım platformlarının ve açık inovasyon modellerinin yaygınlaşmasını teşvik etmektedir. Bu araçlar hem disiplinlerarası hem de uluslararası düzeyde Ar-Ge çalışmalarının ölçeğini ve etki gücünü artırır. Örneğin Li ve Zhang (2024) yaptıkları çalışmada, dijital dönüşümün finansman engellerini azaltarak ve iletişim verimliliğini artırarak Ar-Ge'nin uluslararası boyutlarını genişlettiğini ifade etmişlerdir.

7.2. Ar-Ge Merkezlerinin Dijital Dönüşümdeki Rolü

Ar-Ge merkezleri, dijital dönüşüm stratejisinin uygulanmasında hem laboratuvar düzeyinde hem de organizasyonel düzeyde kritik aktörlerdir. Bu merkezler:

- **Deney-Tabanlı Uygulama ve Pilot Sistem Sağlama:** Yeni dijital araçların (robotik sistemler, otomasyon, kalite değerlendirme robotları vb.) prototipleri burada test edilir. Bir Japon şirketi örneğinde, Ar-Ge merkezleri kalite değerlendirme işlerini otomatikleştirmek, dış verileri kullanmak ve veri tabanlı formülasyon geliştirmek gibi öncelikleri belirlemiştir (Lion Corporation, 2024).
- **Veri Altyapısı ve Bilgi Yönetimi:** Ar-Ge merkezleri, deneme-veri toplama, deney çıktılarının depolanması, analiz edilmesi ve paylaşılması için gerekli altyapıyı kurar; bu da dijital dönüşümün başarısının teknik temellerinden biridir.
- **İnovasyon Ekosistemini Geliştirme:** Üniversiteler, özel sektör, kamu araştırma kuruluşları gibi paydaşlarla iş birliği kurarak açık

inovasyon modellerini destekler. Merkezler bu tür iş birlikleri sayesinde araştırma çıktılarının ticarileşmesine ve dönüşüme hız kazandırmasına katkı sağlar.

- **Organizasyonel ve Kültürel Değişim Liderliği:** Ar-Ge merkezleri, dijital yetkinliklerin geliştirilmesi, proje yönetim yaklaşımlarının modernizasyonu ve kurum içi kültürün yenilikçiliğe açık hale gelmesi gibi değişim süreçlerini yönlendirir.

8. Sonuç ve Değerlendirme

Genel olarak, mühendislik alanında Ar-Ge ile dijital dönüşüm arasındaki etkileşim hem kurumsal rekabet gücünü hem de bilimsel ve teknolojik inovasyon kapasitesini arttırmaktadır. Dijital teknolojilerin Ar-Ge süreçlerine entegrasyonu, ürün geliştirme hızını ve kaliteyi artırırken maliyetleri düşürmekte, Ar-Ge çıktılarını daha etki odaklı hale getirmektedir.

Ar-Ge merkezlerinin dijital dönüşümdeki rolleri, organizasyonel liderlik, veri altyapısı, iş birliği ağları ve kültürel adaptasyon gibi boyutlarla şekillenmektedir. Başarı; yalnızca teknolojik araçların kullanılmasıyla değil, stratejik vizyonun, örgütsel öğrenme kapasitesinin, insan kaynağının donanımlı olmasının ve dijital olgunluk modelinin benimsenmesinin birleşimiyle mümkün olmaktadır.

Bu çalışmada ele alınan konular, mühendislik disiplinlerindeki kurumlar açısından stratejik bir rehber niteliği taşımaktadır. ArGe süreçlerinin dijital teknolojilerle bütünleştirilmesi, kurumların yenilik üretme kapasitelerini arttırmakta ve dijital dönüşüm stratejilerinin etkin biçimde uygulanmasını sağlamaktadır. Ayrıca Ar-Ge merkezlerinin dijitalleşme sürecindeki rolleri, yalnızca teknolojik yenilikleri değil, aynı zamanda veri temelli karar alma, iş birliği kültürü ve sürekli öğrenme yetkinliklerinin gelişimini de desteklemektedir.

Geleceğe yönelik araştırmalarda, dijital dönüşümün sürdürülebilirliği, etik sorumlulukları, dijital beceri açığı ve veri güvenliği gibi konuların mühendislik alanı bağlamında daha derinlemesine ele alınması gerekmektedir. Bu tür çalışmalar, yalnızca teknolojik ilerlemeyi değil, aynı zamanda insana, topluma ve çevreye duyarlı bir inovasyon kültürünün oluşmasına da katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Airbus. (2023). Sustainability and Innovation in Aviation. <https://www.airbus.com/>
- Baki, B., & Serdar, D. (2020). Sanayi 4.0 olgunluk düzeyinin değerlendirilmesine yönelik çok kriterli bir yaklaşım: lojistik sektörü uygulaması. Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 38(4), 655-693.
- Brothers, K. B., & Rothstein, M. A. (2015). Ethical, legal and social implications of incorporating personalized medicine into healthcare. Personalized medicine, 12(1), 43–51.
- Bohnsack, R., Pinkse, J., & Kolk, A. (2014). Business models for sustainable technologies: Exploring business model evolution in the case of electric vehicles. Research Policy, 43(2), 284–300.
- Chen, P., & Kim, S. (2023). The impact of digital transformation on innovation performance - The mediating role of innovation factors. Heliyon, 9(3), e13916.
- Chen, Z., & Xing, M. (2015). Upgrading of textile manufacturing based on Industry 4.0. 5th International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering, Atlantis Press.
- Doğan, K., & Arslantekin, S. (2016). Büyük Veri: Önemi, Yapısı ve Günümüzdeki Durum. Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi, 56(1), 15–36.
- Erdağ, O. V., & Can, E. (2019). Stratejik Uyumlaşma Olgunluk Ölçeğinin Türkçeye Uyarlanması. Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 12(3), 361-383.
- European Commission. (2020). Horizon Europe Strategic Plan 2021–2027.
- European Commission. (2022). The twin green & digital transition: How sustainable digital technologies could enable a carbon-neutral EU by 2050. The Joint Research Centre: EU Science Hub.
- Gokhberg, L., & Meissner, D. (2013). Science, Technology and Innovation Policy for the Future: Potentials and Limits of Foresight Studies. Springer.
- Gür, Ş., & Eren, T. (2023). Big Data and Its Implementation in Health Industry. In İ. İyigün & Ö. F. Görçün (Eds.), Health 4.0 and Medical Supply Chain (pp. 97–106).
- Hagedoorn, J., & Cloudt, M. (2003). Measuring innovative performance: Is there an advantage in using multiple indicators? Research Policy, 32(8), 1365–1379.
- Hounshell, D. A. (1984). From the American System to Mass Production, 1800–1932. Johns Hopkins University Press.

- Imran, S., Mahmood, T., Morshed, A., & Sellis, T. (2021). Big Data Analytics in Healthcare- A Systematic Literature Review and Roadmap for Practical Implementation. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 8(1), 1-22.
- Kang, H. S., Lee, J. Y., Choi, S., Kim, H., Park, J. H., Son, J. Y., Kim, B. H., & Do Noh, S. (2016). Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 3, 111–128.
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23.
- Li, Y., & Zhang, Q. (2024). Corporate Digital Transformation and the Internationalization of R&D. *Sustainability*, 16(21), 9262.
- Lion Corporation. (2024). Digital Technology in R&D Report.
- Loebbecke, C. & Picot, A. (2015). Reflections on societal and business model transformation arising from digitization and big data analytics: A research agenda. *The Journal of Strategic Information Systems*, 24(3), 149-157.
- Manyika, J., Chui, M., Brown, B., Bughin, J., Dobbs, R., Roxburgh, C., & Hung Byers, A. (2011). *Big Data: The Next Frontier for Innovation, Competition, and Productivity*. McKinsey Global Institute.
- Men, F., Dong, F., Liu, Y., & Yang, H. (2023). Research on the Impact of Digital Transformation on the Product R&D Performance of Automobile Enterprises from the Perspective of the Innovation Ecosystem. *Sustainability*, 15(7), 6265.
- Nelson, R. R., & Winter, S. G. (1982). *An Evolutionary Theory of Economic Change*. Harvard University Press.
- Obitko, M., Jirkovský, V., & Bezdiček, J. (2013). Big data challenges in industrial automation. In: Marik, V., Lastra, J. L., & Skobelev, P. (eds.) *HoloMAS 2013*. LNCS, 8062:305–316. Springer, Heidelberg.
- OECD. (2015). *Frascati Manual 2015: Guidelines for Collecting and Reporting Data on Research and Experimental Development*. OECD Publishing.
- Özel, S. & Öztemel, E. (2018). İşletmelerde Teknoloji Yönetimi ve Yetkinlik Bazlı Değerlendirme. *Yönetim Bilimleri Dergisi*, 16(31), 409-425.
- Rose, J., Lukic, V., Milon, T., & Cappuzzo, A. (2016). *Sprinting to value in Industry 4.0*. BCG Perspectives.
- Sağbaş, A. & Gülseren, A. (2019). Endüstri 4.0 Perspektifinde Sanayide Dijital Dönüşüm ve Dijital Olgunluk Seviyesinin Değerlendirilmesi. *European Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2(2), 1-5.

- Sanders, A., Elangeswaran, C., & Wulfsberg, J. (2016). Industry 4.0 implies lean manufacturing: research activities in Industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 9(3), 811-833.
- Smit, S., Tacke, T., Lund, S., Manyika, J., & Thiel, L. (2020). The future of work in Europe: automation, workforce transitions, and the shifting geography of employment. McKinsey Global Institute.
- Tassey, G. (2014). Competing in advanced manufacturing: The need for improved growth models and policies. *Journal of Economic Perspectives*, 28(1), 27–48.
- Taylor, F. W. (1911). *The Principles of Scientific Management*. Harper & Brothers.
- Teichert, R. (2019). Digital transformation maturity: A systematic review of literature. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 67(6), 1673–1687.
- TÜBİTAK. (2024). Ar-Ge ve Yenilik Programları. <https://www.tubitak.gov.tr/>
- TÜSEB. (2024). Sağlıkta Ar-Ge ve Yenilikçi Uygulamalar. <https://www.tuseb.gov.tr/>
- United Nations. (2020). *Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. UN Publications.
- World Health Organization. (2022). *Global Health R&D Observatory*.
- Zeng, J., Yang, L. T., Lin, M., Ning, H., & Ma, J. (2020). A survey: Cyber-physical-social systems and their system-level design methodology. *Future Generation Computer Systems*, 105, 1028–1042.



BÖLÜM 17

AISI 304L Paslanmaz Çeliğin CNC Lazer ile Kesilmesinde Kullanılan Parametrelerin Etkisi

Burak Kalkan¹ & Yunus Kayır²

1.GİRİŞ

CNC lazer kesim teknolojisi, endüstrilerde ve üretim süreçlerinde büyük bir öneme sahiptir. Sürekli olarak geliştirilen yeni teknolojiler ve yenilikler, daha hızlı ve daha hassas kesim yapılmasını sağlayarak maliyetleri düşürmektedir.

Günümüzde Lazer teknolojisi kullanılan Lazer Kesim Makineleri; Otomotiv, Denizcilik, Havacılık, Ulaşım Sistemleri, Uzay Teknolojileri, Savunma Sanayi, İnşaat, Reklam, Grafik, Ahşap Şekillendirme gibi çok geniş bir yelpazede kullanım alanına sahiptir. Farklı endüstriyel alanlarda tercih edilen Lazer kesim makineleri, üstün performansı ve istenilen parçaların kolaylıkla, hızlı bir şekilde imal edilebilmesi nedeniyle özellikle sac işleme sektöründe de tercih edilmektedir.

Günden güne hızla gelişen lazer teknolojisi sayesinde inovatif ürünlerin hızlı ve minimum maliyetlerle global pazarlarda tüketicilere ulaştırılabilmesi için geleneksel yöntemlerin aksine daha rekabetçi, işçilik maliyetlerinin, firelerin, zaman kayıplarının minimize edildiği sistemler ön plana çıkmaktadır. Lazer kesim makineleri, ilk yatırım maliyetleri yüksek olmasına rağmen, parçaya temas etmeden malzemeyi kesebilme kabiliyeti, herhangi bir takım kalıp aşınması gerçekleşmemesi, malzemenin yüksek hızlarda kesilebilmesi, esnek ve kullanıcı dostu kullanım kolaylığı, çevre dostu yapısı ve kesim sonrası elde edilen parçalarda ikincil veya üçüncül temizlik işlemlerine ihtiyaç duyulmadan yüzey kalitesi yüksek ürünler elde edilebilmesi nedeniyle endüstrideki uygulamalarda tercih edilmektedir. Günümüzde Metal ve metal olmayan malzemeler, kullanılan CAD / CAM programlarıyla kolaylıkla şekillendirilebilmektedir. Lazerle malzeme kesim prosesleri hızlı, minimum fireyle istenilen kesim kalitede yapılabilmektedir [1].

Gelecekte ise lazer kesim teknolojisi, daha büyük ve daha güçlü lazerlerin geliştirilmesi ve yapay zeka ile entegre edilmesiyle daha da önemli hale gelecektir. Fakat istenilen kalitede ürünler çıkarabilmek için kesim işlemini

¹ Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği, 0000-0002-1277-1705

² Prof. Dr., Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği,
0000-0001-6793-7103

gerçekleştirmeden önce gerekli işlem parametrelerinin doğru seçilmesi büyük önem arz etmektedir.

Aksi takdirde oluşabilecek kalitesizlik maliyetleri, çıkacak hurda miktarındaki artış, gereksiz işçilik, zaman ve maliyet kayıpları ile rekabetçi olmayı güçleştirecektir.

Bütün bunlar ele alındığında lazer de kullanılan parametrelerin önemi ortaya çıkmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarda özellikle kesilmesi diğer malzemelere göre daha zor olan paslanmaz malzemelerin araştırılması yeterli oranda değildir. Paslanmaz çelik, üstün korozyon direnci, yüksek mekanik özellikleri, yüksek mukavemeti, şekillendirilebilirliği, ısı ve elektriksel iletkenliği nedeniyle denizcilik, havacılık, sıhhi tesisat, endüstriyel ekipman ve inşaat sektörlerinde yaygın olarak tercih edilen bir malzeme türü haline gelmiştir

2. PASLANMAZ ÇELİKLER

Paslanmaz çelik, içinde en az %10,5 - 12 krom (Cr) bulunan ve yüzeyinde koruyucu bir krom oksit (Cr_2O_3) tabakası oluşturarak korozyona karşı yüksek direnç sağlayan demir esaslı bir alaşımdır. Dayanıklılığı, hijyenik yapısı ve estetik görünümü nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanılır. Resim 1 de örnek paslanmaz çelik malzeme gösterilmektedir.



Resim 1. Silindirik formda Paslanmaz çelik malzeme [2].

2.1. Paslanmaz Çelik Türleri

Paslanmaz çelikler, yüksek korozyon direnci, dayanıklılık ve hijyen özellikleri sayesinde birçok endüstride tercih edilir. Ancak tüm paslanmaz çelik türleri aynı performansı göstermez. En yaygın kullanılan türleri, kaliteleri Çizelge 2’de verilmiş olup aşağıda özetlenmiştir.

Çizelge 1. Paslanmaz çelik türleri ve avantajları/dezavantajları [3].

Tür	Avantajlar	Dezavantajlar	
Östenitik	Yüksek korozyon direnci, iyi şekillendirilebilirlik	Yüksek maliyet, ısıl işleme sertleşmez	
Ferritik	Ekonomik, oksidasyon direnci iyi	Düşük tokluk, kaynak kabiliyeti sınırlı	
Martenzitik	Yüksek sertlik, iyi aşınma direnci	Korozyon direnci zayıf	
Dubleks	Yüksek mukavemet, iyi korozyon direnci	Kaynak zorlukları	
Çökelme Sertleşmeli	Yüksek dayanım, iyi korozyon direnci	Üretimi karmaşık, maliyetli	

Piyasada bulunan paslanmaz çelik türleri aşağıda verilmiştir:

Östenitik Paslanmaz Çelikler: En yaygın gruptur. %16-26 Cr, %3-22 Ni içerir. Manyetik değildir, kaynaklanabilir ve yüksek korozyon direncine sahiptir. (Örn: 304, 316 kalite).

Ferritik Paslanmaz Çelikler: Daha az nikel içerir veya hiç içermez. Manyetiktir, korozyon direnci orta düzeydedir. Dekoratif uygulamalarda tercih edilir. (Örn: 430 kalite).

Martenzitik Paslanmaz Çelikler: Isıl işleme sertleştirilebilir. Yüksek sertlik ve dayanım sunar ancak korozyon direnci düşüktür. (Örnek: 410, 420 kalite).

Dubleks Paslanmaz Çelikler: Östenitik ve ferritik yapıların birleşimidir. Mukavemet ve korozyon direnci dengelidir. Petrokimya ve denizcilik sektörlerinde kullanılır. (Örnek: 2205 kalite).

Çökelme Sertleşmeli Paslanmaz Çelikler: Al, Cu, Ti, Nb gibi elementlerle çökelme sertleşmesi yapılır. Yüksek mukavemet ve iyi korozyon direnci sunar. (Örnek: 17-4 PH) [4].

Çizelge 2. Paslanmaz çelik kaliteleri, avantaj ve kullanım yerleri [5].

Tür	Kalite	Avantaj	Kullanım Alanı
Östenitik	AISI 304 AISI 316	Yüksek korozyon direnci, hijyenik,	Gıda, kimya, tıp, dekorasyon
Ferritik	AISI 430	Ucuz, manyetik	Ev eşyaları, iç mekanlar
Martenzitik	AISI 410 AISI 420	Sert, aşınmaya dayanıklı	Bıçak, alet, valf
Dubleks	AISI 2205	Mukavemet, korozyon dengesi	Petrokimya, denizcilik

AISI 304 (EN 1.4301): En yaygın kullanılan paslanmaz çelik olup, kimyasal bileşimi yaklaşık %18 Cr ve %8 Ni içerir. Manyetik değildir, iyi kaynaklanabilir ve şekillendirilebilir. Isıl işlemlerle sertleşmez, ancak soğuk şekillendirme ile dayanımı artırılabilir. Evye, mutfak gereçleri, gıda ekipmanları, dekoratif kaplamalarda tercih edilmektedir. Üstün özellikleri:

- Yüksek korozyon direnci
- Uygun maliyet / performans dengesi
- Kolay işlenebilirlik ve kaynak kabiliyeti
- Hijyenik yapı

AISI 316 (EN 1.4401): Daha çok deniz ve kimya ortamları için tercih edilen paslanmaz çeliğin yapısında, %16-18 Cr, %10-14 Ni ve %2-3 Mo içerir. Molibden ilavesi, klor ve tuzlu suya karşı üstün direnç sağlar. Üstün özellikleri:

- Klorürlü ortamlarda mükemmel korozyon direnci
- Hijyenik ve uzun ömürlü yapı
- Kimya ve ilaç endüstrisinde yüksek performans

AISI 430 (EN 1.4016): Ekonomik bir malzeme olup, beyaz eşyalar, fırın içi parçalar, mimari süslemeler, vb yerlerde kullanımı yaygındır. Yapısında %16-18 Cr içerir. Fakat nikel bulunmaz. Manyetiktir, orta düzeyde korozyon direnci sunar ve düşük maliyetlidir. Üstün özellikleri:

- Düşük maliyet
- Dekoratif ve iç mekan uygulamaları için yeterli dayanım
- Isıl genleşmesi az, ısıya dayanıklıdır

AISI 410 / 420: Isıl işleme sertleştirilebilir, yüksek mekanik dayanım ve aşınma direnci sağlar. Ancak korozyon direnci daha düşüktür. Bıçak, makas, cerrahi alet, valf ve pompa bileşenleri, vb. yerlerde kullanılır.

Makine imalat sanayisi dikkate alındığında, en yaygın paslanmaz çelik türleri östenitik sınıfa aittir (özellikle AISI 304 ve 316). Bu türler, yüksek korozyon direnci, işlenebilirlik ve hijyenik özellikleri sayesinde gıda, kimya, tıp ve denizcilik sektörlerinde standart haline gelmiştir.

2.2. AISI 304L malzeme

304 kalite dünyada en sık ve çok yönlü kullanılan paslanmaz çeliğidir. Mükemmel şekillenebilme ve kaynak kabiliyeti vardır. 304'ün östenitik yapısı ara tavlama yapmadan derin sıvama yapılabilmesini sağlar, dolayısıyla evye, doğal gaz bacaları ve kulplu tencere gibi derin sıvama gerektiren üretimlerde tercih edilir. Hemen hemen her alanda kullanım avantajı bulunan 304 paslanmaz çelikler, %18 krom, %8 nikelden oluşmaktadır. Yüksek oranda talep gören bu ürünler, suya dayanıklı formuyla da son derece kusursuz bir işlevsellik sunmaktadır.

Bu kalite EN normuna göre 1.4301 ya da X5CrNi18-10, UNS normuna göre ise S30400 olarak adlandırılmaktadır. Bu paslanmaz çelik kalitesi; kimyasal bileşiminin, mekanik özelliğinin, kaynak yapılabilirliğinin ve korozyon-oksidadayson direncinin fiyatına oranla çok iyi olması sebebiyle tercih edilir. Paslanmaz çelik kalitesi piyasada kolay bulunabilirlik açısından, kolay şekil verilebilmesi açısından ve rahat kaynak yapılabilmesinden ötürü en sık tercih edilen paslanmaz kalitelerinden birisidir. 304 kalite paslanmaz östenitik paslanmazlar grubuna girmektedir. Mekanik dayanım açısından çoğu zaman yeterli olan bu paslanmaz çelik kalitesi, yüksek akma ve kopma dayanımı istenen yerlerde tercih edilmez standart bir dövülebilme kabiliyetine sahiptir. Metal dövmenin aşırı yoğun olduğu yerlerde tercih edilmemelidir [6].

3. LAZER TEKNOLOJİSİ

Lazer teknolojisi, yüksek yoğunluklu ve yönlendirilmiş ışık enerjisinin kontrollü biçimde kullanılmasıyla birçok endüstriyel alanda devrim yaratmıştır. Kesim, kaynak, delme, markalama ve yüzey işlemleri gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılan lazer sistemleri, üretimde hız, hassasiyet ve kaliteyi artırmaktadır. Resim 2'de lazer ile bir malzemenin kesilmesi verilmiştir.



Resim 2. Lazer ile kesilen bir malzeme [7].

Lazer (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), uyarılmış ışığa yoluyla tek dalga boyuna sahip, odaklanabilir ve yüksek enerjili bir ışık demeti üretir. 1960 yılında ilk lazerin geliştirilmesinden bu yana teknoloji, sanayiden tıba, iletişimden savunma sanayiine kadar geniş bir kullanım alanına ulaşmıştır. Özellikle imalat sektöründe lazer kesim teknolojisi, yüksek doğrulukta ve temassız işleme imkânı sunmasıyla ön plana çıkmaktadır. Lazer kesim işlemi, yoğun enerjiye sahip lazer ışınının malzeme yüzeyine odaklanmasıyla gerçekleştirilir. Odak noktasında oluşan ısı, malzemeyi eritme veya buharlaştırma seviyesine getirir. Kesim işlemi sırasında genellikle oksijen, azot veya hava gibi yardımcı gazlar kullanılarak kesim bölgesi temizlenir ve kalite artırılır. Bu yöntem, geleneksel kesme işlemlerine kıyasla daha az deformasyon ve yüksek ölçü hassasiyeti sağlar. Günümüzde en çok tercih edilen iki lazer türü fiber lazer ve CO₂ lazer sistemleridir.

3.1. Fiber Lazer teknolojisi



Resim 3. Fiber lazer ile yapılan bir malzeme kesme işlemi [8].

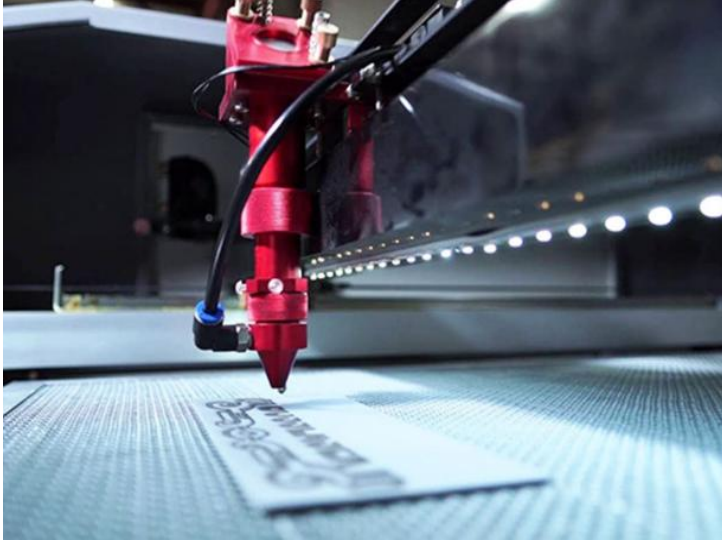
Fiber lazer, farklı malzemeleri lazerle kolaylıkla kesebilen yoğun bir ışık demeti sağlamak için yüksek teknolojiye sahip fiber optik bileşenler kullanır. Aşındırma, tavlama ve gravür gibi metal işlemleri için en iyi seçimdir. Fiber lazerlerin genel konsepti ve süreci son derece basit ve çok yönlüdür. Odak noktası, tüm ışığı tek bir noktaya yoğunlaştırmak için fiber optik kullanan dağıtım mekanizmasıdır. Fiber lazerin çalışma mekanizması da bu basitliği yansıtır. Lazer kesicideki fiber optik ışığı alır ve lazer işaretçiye yükseltir. Kesme başlığı, hassasiyet ve doğruluk için CNC kullanır. Ayrıca, fiber optik, tüm sistemin genel doğruluğunu daha da artıran bir dizi ek odak lensine sahiptir. Son olarak, lazer kesici, kesme işlemini kolaylaştırmak için temizleme gazı olarak NO_2 veya O_2 kullanır [9]. Fiber lazerler, lazer ışığını özel optik fiberler aracılığıyla üreten ve ileten sistemlerdir. Yaklaşık $1.06 \mu\text{m}$ dalga boyuna sahip olan fiber lazerler, özellikle metal kesiminde yüksek verimlilik ve hız sağlar.

Avantajları: Enerji verimliliği yüksektir (yaklaşık %40'a kadar). Bakım gereksinimi düşüktür, optik aynalar kullanılmaz. İnce saclarda kesim hızı oldukça fazladır. Yansıtıcı metallerde (alüminyum, pirinç, bakır) etkili sonuç verir.

Dezavantajları: Kalın malzemelerde kesim kalitesi düşebilir. Metal dışı malzemelerde (ahşap, pleksi, plastik) etkisizdir.

3.2. Karbon (CO_2) Lazer Teknolojisi

CO_2 lazerler, yüksek güçlü ışık parçacıklarının birbirleriyle çarpışması sonucunda daha kalın malzemeleri kolaylıkla kesmek için kullanılan bir tür lazerdir. Bu lazerler, bir rezonatör, temizleme gazları ve yüksek hızlı üfleyicilerin bir kombinasyonunu kullanarak yüksek yoğunluklu lazer üretir.



Resim 4. Karbon lazer ile yapılan kesme işlemi [10].

CO₂ lazerler, fiber lazerlerden farklı olarak, ışın yolu dağıtım sistemlerinde odak lensleri yerine yansımaya ve yeniden odaklama sürecini kullanır. CO₂ lazerler, karbondioksit gazının uyarılmasıyla oluşturulan 10.6 μm dalga boyuna sahip lazer ışınını kullanır. Bu sistem, hem metal hem de metal dışı malzemelerde kullanılabilir.

Avantajları: Geniş malzeme çeşitliliğinde etkilidir (metal, ahşap, plastik, deri vb.). Kalın sac kesimlerinde düzgün ve parlak yüzey sağlar. Metal dışı malzemelerde yüksek kalite sunar.

Dezavantajları: Enerji tüketimi yüksektir. Bakım ve gaz değişimi gerektirir. Yansıtıcı metallerde ışık geri yansımaları riski vardır.

Lazer teknolojisi, modern üretim süreçlerinde yüksek hassasiyet, düşük hata payı ve yüksek verimlilik sağlayan yenilikçi bir yöntemdir. Fiber lazer sistemleri, enerji verimliliği ve hız avantajıyla ince metal kesiminde öne çıkarken, CO₂ lazer sistemleri geniş malzeme çeşitliliği ve kalın kesim kabiliyetiyle tercih edilmektedir. Uygulama amacına, malzeme türüne ve ekonomik koşullara göre uygun lazer türünün seçilmesi, üretim kalitesi ve maliyet verimliliği açısından büyük önem taşır.

3.3. CNC Lazer Makineleri

Günümüzde, endüstrilerde ve üretim süreçlerinde hız, hassasiyet ve verimlilik büyük önem taşımaktadır. Bu ihtiyaçların karşılanmasında CNC lazer makineleri, kesim işlemlerinde öncü bir rol oynamaktadır. CNC (Computer Numerical

Control) teknolojisinin lazerle birleşimi, çeşitli malzemelerin hızlı ve hassas bir şekilde kesilmesini sağlamaktadır. Bu makinelerin temel çalışma prensibi, bir lazer kaynağının üretilen ışınları odak noktasına yönlendirilmesi ve bu odak noktasını malzemenin üzerinde gezdirerek kesim yapmasıdır. CNC kontrol sistemi, malzeme ve kesim parametrelerine göre lazerin hareketini yönetir. CNC lazer makineleri, geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Özellikle metal, ahşap, plastik, cam ve taş gibi birçok farklı malzemeyi kesme yeteneği, endüstrilerde çeşitli kullanım alanlarına olanak tanır. Otomotiv, havacılık, reklam, metal işleme ve inşaat sektörleri, CNC lazer makinelerinin yaygın olarak kullandığı alanlardan sadece birkaçıdır. CNC lazer makinelerin üstün yanları:

Yüksek Hassasiyet: CNC kontrol sistemi, kesim işlemlerini çok yüksek hassasiyetle gerçekleştirebilir.

Hızlı Kesim: Lazer teknolojisi, malzemeleri hızlı ve etkili bir şekilde kesmeyi sağlar.

Malzeme çeşitliliği: Metal, ahşap, plastik gibi birçok farklı malzemede kullanılabilir.

Otomasyon: CNC kontrolü, işlemlerin otomatikleştirilmesine olanak sağlar.

Minimum Malzeme Kaybı: Kesim sırasında minimum malzeme kaybı sağlar.

CNC lazer makinelerinin kullanımında güvenlik büyük önem taşır. Operatörleri lazer ışınlarına karşı koruyucu ekipman kullanmalı ve iş güvenliği standartlarına uymalıdır. Ayrıca, üretilen parçaların kalitesini artırmak için kalite kontrol süreçleri de entegre edilmelidir. CNC lazer makineleri, teknolojinin gelişmesiyle birlikte sürekli olarak yenilenen ve gelişen bir alandır. Gelecekteki trendler arasında daha yüksek güçlü lazerler, daha hızlı kesim hızları ve yapay zeka entegrasyonu gibi özellikler bulunmaktadır [11].

4. FİBER VE CO₂ LAZER KARŞILAŞTIRMASI

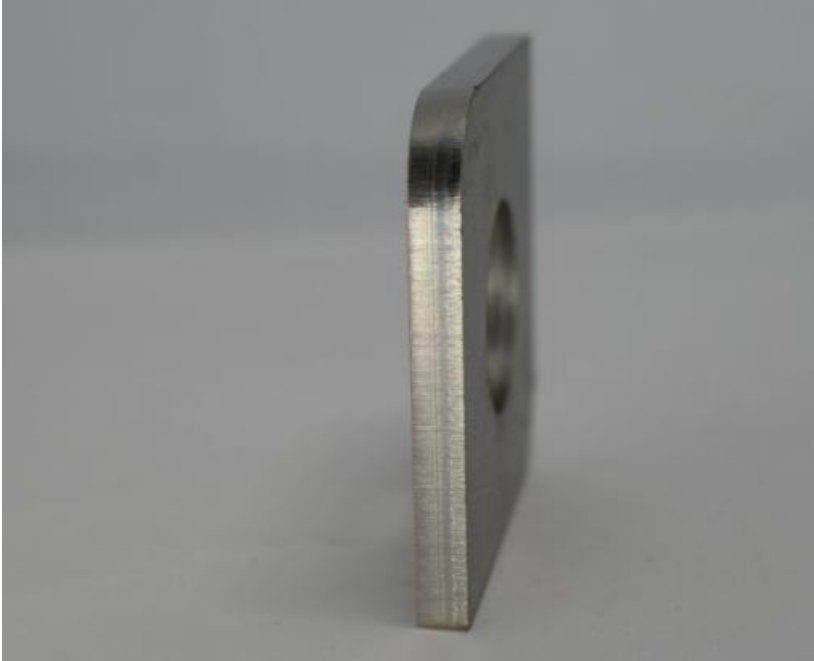
Fiber lazer mi CO₂ lazer mi sorusu oldukça yaygın bir tartışmadır. Çünkü iki teknoloji de imalat sektöründe kolayca bulunabilir ve kullanılabilir. Bazıları CO₂ lazerlerin yetkinliklerinin daha iyi olduğuna inanırken, diğerleri fiber lazerlerin çeşitli yenilikler getirdiğini ve bunun da fiber lazeri daha iyi bir alternatif haline getirdiğini söylüyor. Ancak, fiber lazer mi CO₂ lazer mi tartışmasının doğru cevabı projenizin detaylarına bağlıdır. Temelde ise, lazer seçimi, elde edilecek olan gerekli hassasiyete ve malzeme özelliklerine bağlıdır.

Bu bölümde fiber ve CO₂ lazerlerin getirdiği yenilikleri ve fiber lazer kesim ile CO₂ lazer kesim arasındaki farkları ele alınacaktır. Çizelge 4'te iki CNC lazer makinesinin temelde benzerlikleri ve farkları verilmiştir.

Çizelge 3. Lazer türleri ve özellikleri [12].

Özellik	Fiber Lazer	CO ₂ Lazer
Lazer Dalga Boyu	1.06 µm	10.6 µm
İnce Metal Kesimi	Çok iyi	Orta
Kalın Metal Kesimi	Orta	İyi
Metal Dışı Malzeme Kesimi	Zayıf	Mükemmel
Enerji Tüketimi	Düşük	Yüksek
Kesim Hızı (İnce sac)	Çok yüksek	Düşük
Bakım Maliyeti	Düşük	Yüksek
Yansıtıcı Metaller	Uygun	Uygun değil
Kesim Kalitesi (kalın sac)	Orta	Yüksek
Yatırım Maliyeti	Yüksek	Orta

Fakat, CO₂ lazerler ile fiber lazerler arasındaki karşılaştırma, çeşitli faktörlerin dikkate alınmasını gerektirir. Teknik faktörlerden kesme hızı ve hassasiyet gibi işlem parametrelerine kadar her şeyi göz önünde bulundurmak önemlidir. İşte fiber ve CO₂ lazerler arasındaki en önemli faktörlerin karşılaştırması:



Resim 5. Fiber lazer ile yapılan paslanmaz kesme işlemi [13].



Resim 6. Karbon lazer ile yapılan paslanmaz kesme işlemi [13].

Enerji Kaynağı: Fiber lazerler, LED'leri kullanarak ışık yayarak başlar ve daha sonra ışığı yükselten fiber optik lensler aracılığıyla yoğunlaştırır. CO₂ lazerler ise CO₂, N₂, Xe gibi gazların karışımını uyararak yoğunlaşan dalgalar oluşturur [14].

Güç Tüketimi: Fiber lazerler son derece verimlidir. CO₂ lazerlere göre %30 daha az güç tüketirler, bu da işi daha hızlı ve daha az enerjiyle yapabildikleri anlamına gelir.

Işığın Dalga Boyu: CO₂ ve fiber lazerler kızılötesi spektrumunda çalışırlar. Genel olarak, CO₂ lazerler 10.600 nm dalga boyunda yayarken, fiber lazerler 780 ila 2200 nm arasında dalga boyuna sahiptir [14].

Kesme Hızları: İnce malzemelerin kesimi söz konusu olduğunda, fiber lazerler daha yüksek kesme hızları sunar. Genel olarak, 2 KW bir fiber lazer, 5 veya 6 KW bir CO₂ lazer kadar hızlı kesim yapabilir. Fiber lazerlerin daha iyi kesme hızı sunmasının nedeni, güç yoğunluğudur. Optik sistem, çok fazla gücü tek bir noktaya odaklar ve bu da CO₂ lazerlere göre daha iyi bir kesme hızı sağlar [14].

Kesim Hassasiyeti: Tam stabilite ve hassasiyet söz konusu olduğunda, fiber lazerler daha iyidir. Ancak imalat sektöründe, kenar düzgünlüğü gibi başka bir hassasiyet boyutu da önemlidir. Bu bağlamda, CO₂ lazerler daha iyi performans gösterir. Seçim tercihlerinize bağlı olarak değişebilir [14].

Kesim Aralığı: Fiber lazer makineleri genellikle metal levhalar için 13 mm'lik bir kesim aralığına sahiptir. Ancak bazı yüksek güçlü versiyonlar, alüminyum gibi daha yumuşak malzemeleri 30 mm'ye kadar kesme kapasitesine sahip olabilir. CO₂ lazerler ise güç seviyelerine bağlı olarak farklı genişlikleri kolaylıkla kesme yeteneğine sahiptir [14].

Sistem Yapılandırması: Fiber lazerler, CO₂ lazerlere kıyasla daha basit ve karmaşık olmayan sistemlere sahiptir. Bu da onların çalıştırılması ve öğrenilmesini daha kolay hale getirir [14].

Yatırım Maliyetleri: Fiber lazerler, CO₂ lazerlere göre daha yüksek bir başlangıç maliyetine sahiptir. Fiber lazer teknolojisi daha yeni olduğu için sınırlı sayıda marka tarafından üretilmektedir. Öte yandan, CO₂ lazerler daha uzun süredir piyasada olduğu için daha uygun fiyatlı makineler bulmak mümkündür.

Elde edilen bilgiler, Fiber lazer ve CO₂ lazer arasındaki karşılaştırmalar sonucu olarak özellikle piyasada en yaygın kullanılan 1-12 mm et kalınlığına sahip malzemelerin hızlı/seri kesimlerinde Fiber lazer ön plana çıktığı görülmüştür.

5. FİBER LAZER KESİM PARAMETRELERİ

Fiber lazer kesim teknolojisi, yüksek enerji yoğunluğuna sahip lazer ışınını kullanarak malzemeleri eritme veya buharlaştırma prensibine dayanan modern bir üretim yöntemidir. Kesim kalitesi, hız ve verimlilik; lazer gücü, kesim hızı, odak konumu, gaz basıncı ve nozul mesafesi gibi birçok parametreye bağlıdır. Fiber lazer sistemleri, katı hal lazerlerinden türetilmiş, lazer ışığını özel optik fiberler aracılığıyla ileten yüksek verimli kesim sistemleridir. Dalga boyu yaklaşık 1.06 µm olan bu lazerler, özellikle metal malzemelerin hassas ve hızlı kesimi için geliştirilmiştir. Kesim kalitesi, yüzey pürüzlülüğü, çapak oluşumu ve kesim hızı gibi sonuçlar doğrudan kesim parametreleriyle ilişkilidir [15]. Fiber Lazer kesiminde dikkate alınması gereken temel parametreler, Çizelge 4' te verilmiş olup, aşağıda detaylandırılmıştır.

Çizelge 4. Fiber lazer makinesinde kesim parametreleri

Sıra No	Parametre
1	Lazer Gücü (W)
2	Kesim Hızı (V)
3	Odak konumu (F)
4	Yardımcı gaz türü ve basıncı (P)
5	Malzeme Kalınlığı Ve Türü

Lazer Gücü (W)

- Lazer gücü, birim zamanda malzemeye aktarılan enerji miktarını belirler.
- Yüksek lazer gücü, kesim hızını artırır ancak fazla enerji malzeme yüzeyinde yanma veya ergime fazlasına yol açabilir.
- Tipik aralık: 500 W – 12.000 W
- Örnek: 3 mm paslanmaz çelik için genellikle 1500–2000 W yeterlidir.

Kesim Hızı (V)

- Kesim hızı, lazer ışınının malzeme üzerinde hareket etme hızıdır.
- Çok düşük hız, malzemenin aşırı ısınmasına; çok yüksek hız ise tam kesim yapılamamasına neden olur.
- Lazer gücü ile kesim hızı arasında doğrudan orantı vardır.

Odak konumu (F)

- Lazer ışını, malzeme kalınlığına göre doğru noktaya odaklanmalıdır.
- Odak noktası malzemenin yüzeyine, içine veya altına ayarlanabilir.
- İnce malzemelerde odak yüzeye yakın tutulur; kalın malzemelerde biraz daha aşağıya alınır.
- Yanlış odak ayarı, kesim genişliği ve yüzey kalitesini olumsuz etkiler.

Yardımcı gaz türü ve basıncı (P)

- Yardımcı gaz (oksijen, azot veya hava), eriyen malzemeyi kesim bölgesinden uzaklaştırmak ve kesim hattını temiz tutmak için kullanılır.
- Oksijen (O₂): Reaksiyonla ek enerji sağlar, kesim hızını artırır ancak kesim yüzeyi oksitli olur.

- Azot (N₂): Temiz, oksitsiz kesim sağlar, ancak enerji tüketimi yüksektir.
- Basınç: 0.5 – 15 bar arası değişir; yüksek basınç, kesim kenarını temizler.

Malzeme Kalınlığı ve Türü

- Malzemenin termal iletkenliği, yansıtıcılığı ve kalınlığı kesim kalitesini etkiler.
- İnce saclarda (≤ 3 mm): Yüksek hız, düşük güç.
- Kalın saclarda (≥ 8 mm): Düşük hız, yüksek güç.
- Paslanmaz çelik, karbon çelik ve alüminyum en sık kullanılan malzemelerdir.

Diğer taraftan, malzemelerin fiber lazer ile kesilmesinde elde edilecek olan kesim kalitesine dolaylı olarak etki eden diğer faktörlerde gözden kaçırılmamalıdır:

Nozul çapı: Gaz akış miktarını ve kesim hattının genişliğini etkiler.

Lazer modülasyonu: Sürekli dalga (CW) veya darbeli (pulsed) çalışma modları kesim türüne göre seçilir.

Işın çapı ve mod kalitesi (M²): Lazerin odaklanabilirliği ve kesim hassasiyetini belirler.

Fiber lazer kesiminde optimum kesim kalitesine ulaşmak, doğru parametre kombinasyonlarının belirlenmesine bağlıdır. Lazer gücü, kesim hızı, odak mesafesi, gaz basıncı ve nozul ayarı birbirini tamamlayan faktörlerdir. Yanlış ayarlanan bir parametre, kesim hattında çapak, yanma veya eksik kesim gibi sorunlara neden olabilir. Dolayısıyla her malzeme ve kalınlık için deneysel olarak belirlenmiş optimum kesim parametreleri kullanılmalıdır. Bu yönde incelenmiş olan bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir [16].

AISI 304 Kalite Östenitik 6mm Paslanmaz Sac malzemenin Fiber lazer ile kesilmesinde kesme parametreleri olarak [17]:

- Gaz basıncı (P): 0.8, 1,
- Frekans (Hz): 3500, 4000, 4500, ve 5000,
- Kesme hızı (V) :20, 24, 28, 32,
- Lazer gücü (Kw) :8, 1.6, 1.8,

kullanılmış ve yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, değişken kesme parametreleriyle kesilmiş sac malzeme üzerinde yapılmıştır. Dijital mikroskop kullanılarak numunelerin kerf genişlikleri ve çapak yükseklikleri ölçülmüştür. Kesme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğü, kerf genişliği ve çapak yüksekliğinin azalmasına neden olmuştur. Frekans değerinin artırılması yüzey pürüzlülük ve çapak yüksekliğinin azalmasına ve kerf genişliğinin artmasına neden olmuştur. Frekans değerinin değiştirilmesinin çapak yüksekliği üzerine önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

2 mm Paslanmaz çelik malzemenin Fiber lazer ile kesilmesinde kesme parametreleri olarak [10]:

- Gaz basıncı (P): 12, 16, 20,
- Frekans (Hz): 3500, 5500, 4500, ve 8000,
- Kesme hızı (V): 8, 25, 33, 41, 66,
- Lazer gücü (Kw) :8, 2, 3, 4,

kullanılmış ve güç, hız, odaklanma mesafesi, yardımcı gaz basınç gibi kesme parametreleri değiştirilerek, bu parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne olan etkileri değerlendirilmiştir. Kesilen parçaların sabitlenmesi için özel bir fikstür yapılarak lazer kesim yüzeyinde oluşan pürüzlülük değerleri profilmetre yardımı ile ölçülmüştür ANOVA ile elde edilen sonuçlara göre yüzey pürüzlülüğü ve çentik genişliği üzerinde en etkili parametrenin sırasıyla %49,01 etki oranı ile Duty cycle ve %31,2 etki oranı ile frekans olduğu görülmüştür. Çoklu yanıtlar üzerinde ise %18,55'lik etki oranı ile frekans en önemli parametredir. Görev döngüsü (Duty cycle) ve odak konumu (Focal position) sırasıyla ikinci ve üçüncü etkili parametreler olduğu belirtilmiştir.

8 mm Paslanmaz çelik malzemenin Fiber lazer ile kesilmesinde kesme parametreleri olarak [18] :

- Gaz basıncı (P): 16
- Kesme hızı (V) :25, 26, 28, 33, 66,
- Lazer gücü (Kw) :4, 3.75,

alınmış ve bu çalışmada kapsamında 304 kalite paslanmaz çelik malzemenin fiber lazer ile kesilmesinde lazer gücü, kesme hızı ve odak mesafesinin kesilen yüzeylerin pürüzlülüğü ve kerf genişliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Box-Behnken deney tasarımına göre parametre çiftleri belirlenerek kesme işlemi gerçekleştirilmiş ve yüzey pürüzlülükleri ile kerf genişlikleri ölçülmüştür. İşlem

parametrelerinin tekil ve etkileşimli etkilerini belirlemek için varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. Yüzey pürüzlülükleri ve kerf genişlikleri için cevap yüzeyi fonksiyonları belirlenmiş ve istenebilirlik fonksiyonu yaklaşımı ile optimum proses parametreleri tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği üzerindeki en etkili parametrenin odak mesafesi olduğu, ilerleme hızının etkisinin sınırlı kaldığı görülmüştür.

1.2 mm ve 5 mm Paslanmaz çelik malzemenin Fiber lazer ile kesilmesinde ise kesme parametreleri olarak [19]:

- Gaz basıncı (P) :12, 6, 18
- Kesme hızı (V) : 20, 25, 33
- Lazer gücü (Kw) :2
- Frekans (Hz) :2000, 2500,

tercih edilmiş ve ANOVA sonuçlarına göre, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en büyük etkiye sahip parametre %51,70 PCR ile ilerleme hızıdır. Çapak yüksekliğine varyans analizi uygulandığında, ilerleme hızının %38,71 PCR ile en fazla etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Optimizasyon sonucunda, en düşük yüzey pürüzlülüğü, 4 odak noktası, 18 bar basınç ve 1200 mm/dak ilerleme hızında 1,25 µm olarak bulunmuştur. En küçük v çapak yüksekliği ise, 5 odak noktası, 15 bar basınç ve 1200 mm/dak ilerleme hızında 504 µm olarak elde edilmiştir.

1 mm, 3 mm ve 6 mm AISI 304L Paslanmaz çelik malzemenin Fiber lazer ile kesilmesi işleminde ise kesme parametreleri olarak [20]:

- Gaz basıncı (P) 1, 2, 3,
- Kesme hızı (V)20, 25, 33,
- Lazer gücü (Kw) 1, 2 ,3 ,4,
- Nozzle yüksekliği,

belirlenmiş ve kesme gücü, lazer gücü, yardımcı gaz basıncı gibi proses parametrelerinin kesme derinliği ve yüzey pürüzlülüğü gibi kesme kalitesi üzerindeki etkisini incelenmiş, en etkili faktörün lazer gücü olduğu ortaya çıkmıştır.

6. SONUÇ

AISI 304L Paslanmaz Çeliğin CNC Lazer ile kesilmesinde kullanılan parametrelerin etkisinin belirlenmesine yönelik bu kitap bölümünün hazırlanmasında, ulusal/uluslararası birçok çalışma incelenmiştir. Elde edilen bilgilerin ışığında genel olarak, Lazer teknolojisinin, üretimde yüksek hassasiyet ve verimlilik sağladığı, Fiber lazerler, ince ve yansıtıcı metal malzemelerde hızlı ve enerji tasarruflu kesim sunarken, CO₂ lazerler kalın metaller ve metal dışı malzemelerde avantajlı olduğu, Fiber lazer kesim CNC kesim makinelerin yaygın olarak tercih edildiği, uygulama ve malzeme tipine göre lazer türü ve parametre seçimi üretim verimliliğini etkilediği anlaşılmıştır. Detayında ise, bazı sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

1. Fiber lazerler, enerji verimliliği, yüksek kesim hızı ve ince metal malzemelerde hassasiyet açısından CO₂ lazerlere üstünlük göstermektedir. CO₂ lazerler ise kalın metal ve metal dışı malzemelerde daha iyi kenar kalitesi ve geniş kesim aralığı sağlamaktadır.

2. Fiber lazer kesiminde lazer gücü, kesim hızı, odak konumu, yardımcı gaz basıncı ve frekans gibi parametreler, yüzey pürüzlülüğü, kerf genişliği ve çapak oluşumunu doğrudan etkilemektedir. Analizler, ilerleme hızı ve lazer gücünün yüzey kalitesi üzerinde en belirleyici faktörler olduğunu ortaya koymuştur.

3. Malzeme kalınlığına göre parametrelerin optimize edilmesi, kesim kalitesi ve verimlilik açısından kritik öneme sahiptir. Örneğin, 1–6 mm paslanmaz saclarda uygun lazer gücü ve odak ayarı ile minimum yüzey pürüzlülüğü ve çapak elde edilebilmektedir.

Sonuç olarak, Fiber lazerler, özellikle ince ve orta kalınlıktaki metallerde yüksek hız ve verimlilik sağlarken, CO₂ lazerler kalın metaller ve metal dışı malzemelerde üstün kesim kalitesi sunar. Bu bulgular, endüstriyel üretimde lazer teknolojisi kullanımında parametre optimizasyonu ve doğru sistem seçimi açısından yol gösterici niteliktedir.

7. KAYNAKLAR

1. Özdemir, A., & Karaca, B. (2020). “Fiber Lazer Kesim Parametrelerinin Kesim Kalitesine Etkisi”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 17(3), 45–52.
2. https://www.aceteklaser.com/tr/co2-lazer-kesimde-kenar-kalitesini-etkileyen-faktorler-nelerdir/?srsltid=AfmBOoqh-6Mr_T5b_mYjhg562ZiafreD41lN73t4Id_troUU8JPhljND
3. Steen, W. M., & Mazumder, J. (2010). *Laser Material Processing*. Springer.
4. Powell, J. (2017). *CO₂ Laser Cutting: Fundamentals and Applications*. Springer.
5. <https://espritautomation.com/co2-vs-fiber-laser-technology/>
6. <https://mersanmetal.com.tr/fiber-ve-co-2-lazer/>
7. Muhammed Aslan 2, Alper Tarkan 3, Özgür Aslan 3 , Celalettin Yuce 2 Multi-Objective Optimization of Fiber Laser Cutting of Stainless-Steel Plates Using Taguchi-Based Grey Relational Analysis Yusuf Alptekin Turkkan 1 , and Nurettin Yavuz
8. Zülfünaz DURUKAN, Ali Riza MOTORCU, Abdulkadir GÜLLÜ 2014 Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Çanakkale Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 29, No 3, 2014
9. Dubey, A.K. ve Yadava, V. (2008) Multi-objective optimisation of laser beam cutting process, *Optics and Laser Technology*, 40(3), 562–570. doi.org/10.1016/j.optlastec.2007.09.002
10. Karthikeyan, R., Senthilkumar, V., Thilak, M. ve Nagadeepan, A. (2018) Application of grey relational analysis for optimization of kerf quality during CO₂ laser cutting of mild steel, *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 19209–19215. doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.276
11. Effect of CO₂ laser cutting process parameters on edge quality and operating cost of AISI316L H. A. Eltawahni¹, M. Hagino², K. Y. Benyounis¹, T. Inoue² and A. G. Olabi³
12. Industrial Eng. Dept., Benghazi University, P. O. Box 1308, Benghazi- Libya hayat.eltawahni2@mail.dcu.ie, Khaled.benyounis2@mail.dcu.ie.
13. <https://www.metaltekendustri.com.tr/urun/paslanmaz-celik-boru/>
14. Muhammed Aslan 2, Alper Tarkan 3, Özgür Aslan 3 , Celalettin Yuce 2 School of Mech. & Manu. Eng., Dublin City University, Dublin 9, Ireland, Abdul.olabi@dcu.ie. Shamlooei M, Zanon G, Valli A, Bison P, Bursi OS. Investigation of thermal behaviour of structural steel S235N under laser cutting

- process: Experimental, analytical, and numerical studies. Eng Struct 2022;269:114754. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114754> . Son, Seungik & Lee, Dongkyoung (2020, October, 103866). The Effect of Laser Parameters on Cutting Metallic Materials MDPI, Materials 2020, 13(20), 4596; <https://doi.org/10.3390/ma13204596>
15. Department of Mechanical Engineering, SS College of Engineering, Udaipur, Rajasthan, India Darshan R. Shah Dheeraj Soni
 16. Soydan, F. (2015). Laser kesim parametrelerinin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Steen, W. ve Mazumder, J. (2010). Laser Material Processing. Fourth Edition, Springer, London.
 17. İbrahim CEBECİ , Barış ÖZLÜ, Halil DEMİR 2020 AISI 304 Kalite Östenitik Paslanmaz Sac Malzemenin Lazerle Kesilmesinde Kesme Parametrelerinin Kesim Kalitesine Etkisinin İncelenmesi Aksaray Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 68100, Aksaray, Türkiye Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, 78050, Karabük, Türkiye NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2022; 11(2), 410-415
 18. Cemalettin YÜCE Paslanmaz çelik malzemelerin fiber lazer kesiminde proses parametrelerinin optimizasyonu Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Cilt 24, Sayı 2, 2019
 19. Hüseyin UZUN, Tez Danışmanı Prof. Dr. Mustafa GÜNAY Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı 2019
 20. Department of Mechanical Engineering, Daido University, 10-3, Takihar-cho, Minami-ku, Nagoya, Japan, Postcode 457-8530, mas.hagino@gmail.com and takinoue@daido-it.ac.jp



BÖLÜM 18

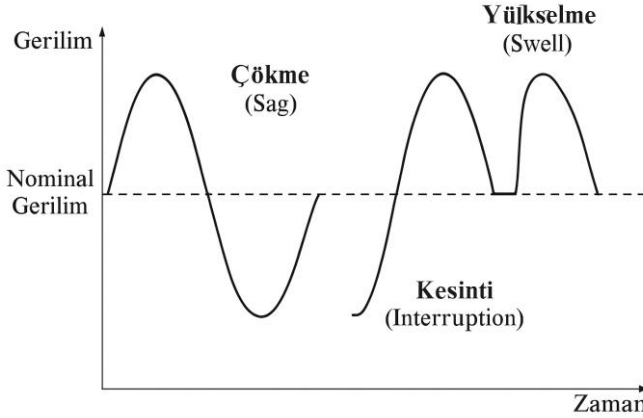
Dinamik Voltaj Regülatörleri (DVR): Güç Kalitesi Yönetiminde Temeller, İleri Kontrol Stratejileri ve Gelecek Trendleri

Okan Bingöl¹ & Fatih Yoldaş²

1. GİRİŞ

1.1. Voltaj Kararlılığının Önemi ve Regülasyon İhtiyacı

Modern elektrik güç sistemlerinin en kritik operasyonel gereksinimlerinden biri, voltaj kararlılığının ve yüksek güç kalitesinin sürekli olarak sağlanmasıdır. Nominal Voltajı referans olarak Çökme (Sag), Yükselme (Swell) ve Kesinti olaylarının zaman içindeki dalga formları şekil 1.1’de gösterilmiştir. Voltaj, tüm elektrikli ve elektronik cihazların tasarlanıp çalıştığı temel referans parametre olduğundan, nominal değerinden sapmalar ciddi sonuçlar doğurur [7].



Şekil 1.1: Nominal Voltajı referans olarak Çökme (Sag), Yükselme (Swell) ve Kesinti olaylarının zaman içindeki dalga formları

Güç Kalitesi Sorunlarının Etkileri

Güç sistemlerindeki kararlılık sorunları; voltaj çökmeleri (sag), voltaj yükselmeleri (swell) ve anlık kesintiler (interruptions) gibi güç kalitesi bozuklukları şeklinde kendini gösterir.

Voltaj Çökmeleri (Sag): Genellikle şebeke üzerindeki büyük yüklerin devreye girmesi veya uzak hatlardaki kısa süreli arızalar sonucunda oluşur. Gerilimin

¹ Prof. Dr., Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, ORCID:0000-0001-9817-7266

² Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, ORCID:0000-0002-5173-0973

nominal değerin %10 ile %90'ı arasına düşmesi durumudur ve birkaç periyot sürebilir. Bu durum, özellikle hassas endüstriyel makineler, veri merkezleri ve tıbbi görüntüleme cihazları gibi kritik yüklerin anında durmasına, yanlış çalışmasına veya arıza moduna girmesine neden olur.

Voltaj Yükselmeleri (Swell): Büyük yüklerin devreden çıkması veya faz-toprak arızalarının geçici olarak meydana gelmesiyle oluşabilir. Gerilimin nominal değerin %110'unun üzerine çıkmasıdır. Bu durum, elektronik devrelerde ve motor yatırımlarında aşırı gerilime yol açarak ekipman hasarı riskini artırır.

Anlık Kesintiler: Genellikle şebeke koruma sistemlerinin arızayı ayırması sırasında meydana gelen, milisaniyelerden birkaç saniyeye kadar sürebilen tam gerilim kaybıdır. Kritik yükler için en yıkıcı bozukluktur [12].

Ekonomik Kayıplar ve Regülasyon İhtiyacı

Güç kalitesindeki bu tür bozukluklar, modern endüstri ve ticaret için yüksek maliyetli sonuçlar doğurur. Kalitesiz elektriğin neden olduğu başlıca ekonomik kayıplar şunlardır [3]:

1. Üretim Duruşları: Hassas yarı iletken imalatı, ilaç üretimi veya montaj hatları gibi süreçlerde, voltaj bozukluğu nedeniyle bir hattın durması dakikada binlerce dolarlık kayba neden olabilir.
2. Veri Kaybı ve Sistem Çökmesi: Veri merkezlerinde veya finansal işlem sunucularında kısa süreli bir çökme bile, kritik veri kaybına, işlem hatalarına ve hizmet kesintisine yol açar.
3. Ekipman Hasarı ve Erken Yaşlanma: Tekrarlanan voltaj dalgalanmaları, motor kontaktörleri, sürücü elektroniği ve diğer bileşenlerin ömrünü kısaltır ve plansız bakım/değişim maliyetlerini artırır.

Bu maliyetleri minimize etmek ve sistem güvenilirliğini maksimize etmek için regülasyon zorunludur. Regülasyonun amacı, voltajın, hassas ekipmanların güvenli ve verimli çalışması için gereken dar bir tolerans bandında (genellikle nominal değerin $\pm 5\%$) tutulmasıdır. Geleneksel regülasyon yöntemlerinin yetersiz kaldığı bu dinamik voltaj sorunlarını çözmek için Dinamik Voltaj Regülatörleri (DVR) gibi ileri güç elektroniği çözümlerine olan ihtiyaç doğmuştur [16].

1.2. Dinamik Voltaj Regülatörlerinin Genel Amacı

Dinamik Voltaj Regülatörü (DVR), gelişmiş bir Güç Elektroniği tabanlı cihaz olup, modern şebekelerde voltaj kalitesi sorunlarına karşı tasarlanmış en etkili çözümlerden biridir. Temel olarak, DVR bir güç sistemine seri olarak bağlanan

ve voltaj çökmeleri (sag), yükselmeleri (swell) veya harmonik bozukluklar gibi şebeke bozukluklarını hızla algılayıp telafi eden aktif bir filtredir [5].

DVR, şebeke ve kritik yük arasına yerleştirilen bir Voltaj Kaynağı İnvertörü (VSI) ve bir seri bağlantı trafosu aracılığıyla çalışır. DVR, şebeke voltajında bir bozukluk algıladığında, milisaniyeler düzeyinde bir tepki süresiyle, nominal voltajı elde etmek için gereken telafi voltajını anlık olarak hesaplar ve sisteme enjekte eder [11].

Adındaki "Dinamik" kelimesi, cihazın geleneksel kademe değiştiricili transformatörler (TDT) gibi mekanik veya yavaş tepkili regülatörlerden ayrılmasını sağlar. DVR'nin dinamikliği, hızlı algılama yeteneği ve güç yarı iletkenleri (IGBT'ler gibi) kullanarak milisaniyeler içinde telafi voltajını üretebilmesinden gelir.

$$V_{yük} = V_{şebeke} + V_{telafi} \quad (1.1)$$

Burada $V_{yük}$, kritik yükün maruz kaldığı voltaj; $V_{şebeke}$, o anki bozuk şebeke voltajı ve V_{telafi} , DVR'nin enjekte ettiği telafi voltajdır [6].

DVR'nin genel ve birincil amacı, bağlı olduğu kritik yükü şebeke kaynaklı tüm voltaj bozukluklarından izole etmektir. Bu, aşağıdaki iki temel işlevi yerine getirerek başılır [6]:

1. Hızlı Voltaj Regülasyonu: Şebeke voltajı nominal değerin dışına çıktığında (çökme veya yükselme), DVR anlık olarak gerekli voltajı ekleyerek (veya çıkararak) yük tarafındaki voltajı hedeflenen tolerans bandında tutar.
2. Yüksek Güç Kalitesi Sağlama: DVR, sadece voltajın genliğini değil, aynı zamanda faz ve harmonik içeriğini de düzelterek yük için temiz, sinüzoidal ve kararlı bir güç kaynağı sağlar.

DVR, özellikle üretim ve hizmet kalitesinin kesintiye uğramaması gereken yarı iletken endüstrileri, veri merkezleri ve hastane ekipmanları için vazgeçilmez bir çözüm olarak kabul edilir.

1.3. Dinamik Voltaj Regülatörlerinin Üstünlükleri

DVR teknolojisinin ortaya çıkışı, sanayinin yüksek güç kalitesine olan talebinin geleneksel regülasyon yöntemlerinin yeteneklerini aşmasıyla doğrudan ilişkilidir. Güç sistemlerinde voltaj regülasyonu, tarihsel olarak daha yavaş ve sınırlı mekanizmalarla sağlanmış, ancak modern hassas yükler bu yöntemlere tahammül edemez hale gelmiştir [18].

DVR'nin gelişimini anlamak için, öncelikle önceki regülasyon yöntemlerinin sınırlamalarını bilmek gerekir:

Kademe Değiştiricili Transformatörler (TDT / OLTC): Geleneksel olarak voltajı düzenleyen bu cihazlar, mekanik anahtarlar kullandıkları için tepki süreleri saniyelerle ölçülür. Bu yavaşlık, milisaniyeler süren voltaj çökmeleri ve yükselmeleri gibi dinamik olayları telafi etmekte tamamen yetersiz kalır.

Statik Var Kompanzatörler (SVC): Güç elektroniği tabanlı olmasına rağmen, SVC'ler esas olarak reaktif güç yönetimi için tasarlanmıştır. Voltajı dolaylı yoldan regüle ederler ve hızlı olsalar bile, aktif güç akışını kontrol etme ve özellikle derin voltaj çökmelerinde tam bir telafi sağlama kapasiteleri sınırlıdır.

Kesintisiz Güç Kaynakları (UPS): UPS'ler anlık ve tam kesintiler için mükemmel bir koruma sağlar ancak genellikle akü ile sınırlı bir çalışma süresine sahiptir ve daha kısa süreli, sık tekrarlanan voltaj çökmeleri (sag) için maliyet-etkin bir çözüm değildir.

DVR, 1990'ların başında, özellikle yarı iletken imalat tesisleri gibi voltaj sag'lerine aşırı duyarlı endüstrilerin talebiyle FACTS (Esnek AC İletim Sistemleri) teknolojileri ailesinin bir üyesi olarak ortaya çıkmıştır [14].

Üstünlükleri

DVR, yukarıda belirtilen sınırlamaları aşarak voltaj regülasyonunda çığır açmıştır. Başlıca üstünlükleri şunlardır [23] :

1. **Üstün Tepki Hızı (Dinamizm):** DVR, güç elektroniği anahtarlarını ve gelişmiş kontrol algoritmalarını kullandığı için, bir voltaj bozukluğunu birkaç milisaniye içinde algılayıp telafi voltajını enjekte edebilir. Bu hız, geleneksel yöntemlerle kıyaslanamaz.
2. **Bağımsız Faz Kontrolü:** Üç fazlı sistemlerde, DVR her bir faza bağımsız olarak gerekli telafi voltajını enjekte edebilir. Bu, dengesiz (unbalanced) voltaj çökmelerinin dahi etkili bir şekilde düzeltilmesini sağlar ki bu, TDT veya SVC gibi cihazların yapamadığı kritik bir yetenektir.
3. **Aktif ve Reaktif Güç Yönetimi:** Bir Voltaj Kaynağı İnvertörü (VSI) kullandığı için, DVR telafi voltajını şebekeye enjekte ederken aktif (P) ve reaktif (Q) gücü bağımsız olarak kontrol edebilir. Bu, sadece voltajı düzeltmekle kalmaz, aynı zamanda güç faktörünü optimize etmeye de yardımcı olur.
4. **Kapsamlı Koruma:** DVR, hem voltaj çökmelerini (sag) hem de voltaj yükselmelerini (swell) telafi etme yeteneğine sahiptir, bu da onu geniş bir güç kalitesi bozuklukları yelpazesine karşı esnek bir çözüm yapar.

DVR, bu dinamik yetenekleri sayesinde günümüzde en kapsamlı ve en hızlı voltaj kalitesi sağlama çözümü olarak öne çıkmaktadır.

1.4. Kitap Bölümün İçeriği

Bu kitap bölümü, Dinamik Voltaj Regülatörleri (DVR) konusunu sistematik bir şekilde ele alarak, okuyucuya temel prensiplerden en güncel akademik trendlere kadar kapsamlı bir bakış açısı sunmayı amaçlamaktadır. Bölümün yapısı, konunun mantıksal akışını takip ederek teknik derinliği aşamalı olarak artırmaktadır [8].

Bölüm 2: Temel Prensipler ve Yapı Bu kısım, DVR'nin fiziksel altyapısına odaklanacaktır. Seri kompanzasyon prensibi detaylı olarak açıklanacak, DVR'nin temel topolojisi (Voltaj Kaynağı İnvertörü- VSI ve seri bağlantı trafosu) tanıtılacak ve kritik bir bileşen olan DC enerji depolama birimi ele alınacaktır.

Bölüm 3: Kontrol Stratejileri ve Algoritmaları DVR'nin performansının kalbi olan kontrol mekanizmaları bu bölümde incelenecektir. Voltaj bozukluklarının hata algılama süreçleri, farklı telafi modları ve DVR'nin milisaniyelik tepkisini sağlayan PID tabanlı ve gelişmiş (Model Tahminli Kontrol gibi) algoritmalar derinlemesine analiz edilecektir.

Bölüm 4: Uygulama Alanları ve Performans Analizi Teorik bilgiyi pratik uygulamalarla pekiştiren bu kısım, DVR'nin kullanıldığı kritik alanları (hassas sanayi, veri merkezleri ve yenilenebilir enerji) gösterecektir. Ayrıca, DVR'nin teknik değerlendirmesinde kullanılan telafi hızı, kapasite ve harmonik bozunma (THD) gibi temel performans parametreleri tartışılacaktır.

Bölüm 5: Güncel Araştırma Konuları ve Gelecek Trendleri Bölüm, alandaki en son akademik gelişmeleri ve gelecek vizyonunu sunacaktır. Çok seviyeli invertörler, Hibrit DVR sistemleri ve SiC/GaN gibi yeni nesil yarı iletken teknolojilerinin DVR üzerindeki dönüştürücü etkileri incelenecektir.

Bölüm 6: Sonuç Bölümün temel bulguları özetlenerek, DVR teknolojisinin mevcut durumu değerlendirilecek ve gelecekteki araştırma ve geliştirme için açık kalan konulara işaret edilecektir.

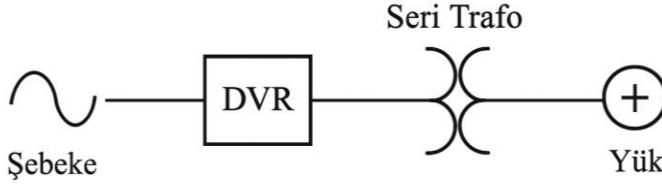
Bu yapı sayesinde okuyucular, DVR'nin neden gerekli olduğunu (Bölüm 1) anladıktan sonra, nasıl çalıştığını (Bölüm 2 ve 3) ve nerede kullanıldığını (Bölüm 4) kavrayacak, son olarak da gelecekteki yönünü (Bölüm 5) görebilecektir.

2. DİNAMİK VOLTAJ REGÜLATÖRLERİNİN TEMEL YAPISI

Bu bölümde, bir DVR'nin temel bileşenlerini ve bu bileşenlerin voltaj bozukluklarını düzeltmek için nasıl iş birliği yaptığını teknik olarak açıklamaktadır. Şebeke, DVR, seri trafo ve yükü gösteren basit bağlantı şeması şekil 2.1'de verilmiştir.

2.1. Seri Kompanzasyon Yapısı

Dinamik Voltaj Regülatörlerinin kalbindeki temel çalışma prensibi Seri Kompanzasyondur. Bu, DVR'nin şebeke ile kritik yük arasına seri (ardışık) olarak bağlandığı anlamına gelir. Bu bağlantı, cihazın tüm yük akımını taşımasını gerektirir, ancak buna karşılık sadece telafi edilmesi gereken voltajı sisteme eklemesine veya sistemden çıkarmasına olanak tanır [21].



Şekil 2.1.: Şebeke, DVR, seri trafo ve yükü gösteren basit bağlantı şeması

Temel Mekanizma: Şebekede bir voltaj bozukluğu (örneğin, bir çökme) meydana geldiğinde, DVR bu hatayı algılar ve kritik yük tarafında nominal voltajı yeniden sağlamak için gerekli olan voltaj farkını (telafi voltajı, V_{telafi}) üretir. Bu prensip, basit bir denklemlle ifade edilebilir:

$$V_{yük} = V_{şebeke} + V_{telafi} \quad (2.1)$$

Burada:

$V_{yük}$: İstenen kararlı nominal voltaj.

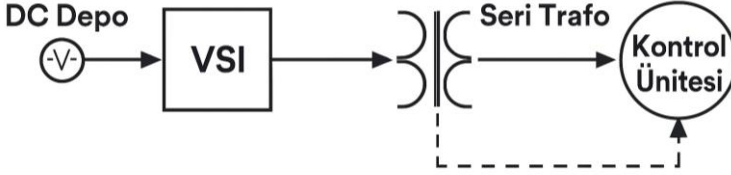
$V_{şebeke}$: Bozukluk anındaki düşük veya yüksek şebeke voltajı.

V_{telafi} : DVR tarafından anlık olarak seri bir şekilde sisteme enjekte edilen voltaj.

DVR, bu telafi voltajını genellikle şebeke voltajı ile aynı fazda (veya ters fazda) olacak şekilde enjekte eder. Bu seri bağlantı sayesinde, DVR sadece telafi voltajı kadar bir gerilim seviyesinde çalışmakla birlikte, yükün tamamını koruma yeteneği kazanır [10].

2.2. Gerim Beslemeli İnverter ve Bağlantı Trafosu

Bir DVR'nin fiziksel yapısı, ana işlevsel bileşenler etrafında şekillenir, DC Depo, VSI, Seri Trafo ve Kontrol Ünitesini oklarla gösteren kapsamlı blok diyagramı şekil 2.2'de görülmektedir.



Şekil 2.2.: DC Depo, VSI, Seri Trafo ve Kontrol Ünitesini oklarla gösteren kapsamlı blok diyagramı

DVR'nin kalbi olan gerilim beslemeli inverter (VSI), sistemdeki en kritik güç elektroniği cihazıdır. DC enerji deposundan aldığı enerjiyi, kontrol biriminin talep ettiği genlik ve faza sahip olan AC telafi voltajına dönüştürür [1].

VSI, genellikle IGBT veya daha yeni SiC modülleri gibi hızlı anahtarlama elemanlarından oluşur. Bu elemanların hızlı anahtarlama (PWM aracılığıyla) sayesinde istenen sinüzoidal dalga formu hassasiyetle oluşturulabilir [1].

Seri Bağlama Trafosu

Bu transformatörün iki temel işlevi vardır:

1. Voltaj Seviyesi Eşleştirme: VSI tarafından üretilen nispeten düşük seviyedeki telafi voltajını, şebekeye enjekte edilmeden önce gerekli olan yüksek voltaj seviyesine yükseltir.
2. Elektriksel İzolasyon: VSI'yi yüksek gerilimli şebeke hattından izole ederek güç elektroniği bileşenlerini korur. Seri trafo, DVR'nin kritik yük akımını taşıdığı için özel olarak tasarlanmış, düşük kaçak endüktanslı bir transformatör olmalıdır. Bu trafo enjeksiyon trafosu olarak ta adlandırılmaktadır.

2.3. DC Enerji Depolama Birimi

DVR'nin telafi voltajını üretebilmesi için bir enerji kaynağına ihtiyacı vardır. Bu enerji, VSI'nin girişinde bulunan DC bağlantı üzerinden sağlanır [15]. Voltaj çökmesi sırasında DVR, yük akımını telafi voltajıyla birlikte basmak zorundadır, bu da aktif güç gerektirir. DC enerji depolama birimi, bu aktif güç ihtiyacını karşılar. Kapsitörler, Aküler ve Süperkapsitörleri Enerji/Güç Yoğunluğu ve Ömür açısından karşılaştırması tablo 2.1'de yapılmıştır.

Bileşen	Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	Güç Yoğunluğu (W/kg)	Ömür (Şarj-Deşarj Döngüsü)
Kapasitör	Çok düşük ($\approx 0.001-0.01$)	Çok yüksek ($\geq 10,000$)	Milyonlarca döngü
Akü (Lityum-iyon)	Orta ($\approx 100-250$)	Orta ($\approx 250-2,000$)	500-2,000 döngü
Süperkapasitör	Düşük ($\approx 1-10$)	Çok yüksek ($\geq 10,000$)	500,000-1,000,000 döngü

Tablo 2.1. Kapasitörler, Aküler ve Süperkapasitörleri Enerji/Güç Yoğunluğu ve Ömür açısından karşılaştırması [15]

Depolama Seçenekleri:

Kapasitörler (DC Link): En yaygın ve temel depolama biçimidir. Genellikle çok kısa süreli (birkaç milisaniye) ve sığ çökmelerin telafisi için kullanılır.

Aküler: Daha uzun süreli veya daha şiddetli voltaj bozukluklarını telafi etmek için kullanılır, ancak daha yavaş şarj/deşarj döngülerine sahiptir.

Süperkapasitörler (Supercapacitors): Akülere göre daha yüksek güç yoğunluğuna ve daha hızlı tepkiye sahiptir, bu da onları sık sık meydana gelen kısa süreli bozukluklar için ideal bir hibrit çözüm yapar [4].

2.4. Kontrol ve Ölçüm Birimleri

DVR'nin "beyni" olan kontrol ünitesi, cihazın dinamik çalışmasını yönetir.

Ölçüm (Sensing): Sürekli olarak hem şebeke voltajı hem de yük voltajı ölçülür. Bu ölçümler, bozukluğu doğru ve hızlı bir şekilde tespit etmek için hayati öneme sahiptir.

Kontrol Mimarisi: Yüksek hızlı DSP veya FPGA tabanlı bir mikroişlemci, ölçülen voltajı referans değerle karşılaştırır, gerekli V_{telafi} 'yi hesaplar ve ardından VSI anahtarlarına gönderilecek olan PWM sinyallerini üretir [2].

3. DVR KONTROL STRATEJİLERİ VE ALGORİTMALARI

DVR'nin dinamik ve hassas çalışması, voltaj bozukluklarını doğru ve hızlı bir şekilde algılayıp, VSI uygun anahtarlama sinyallerini göndermekle yükümlü olan kontrol sistemine bağlıdır [14].

3.1. Hata Algılama ve Voltaj Telafisi

Kontrol sürecinin ilk ve en kritik adımı, şebeke voltajındaki bozukluğun doğru bir şekilde belirlenmesidir.

Referans ve Hata Algılama: Kontrol sistemi, yükün alması gereken ideal, nominal (referans) voltajı V_{ref} sürekli olarak bilir. Ölçülen anlık şebeke voltajı V_s bu referanstan çıkarılarak hata voltajı V_{hata} (aynı zamanda gerekli V_{telafi} 'ye eşittir) hesaplanır:

Koordinat Dönüşümleri (Clarke ve Park Dönüşümleri): Hata voltajının hızlı ve kararlı bir şekilde kontrol edilebilmesi için, üç fazlı AC sinyaller genellikle senkronize döner çerçeveye ($d-q$) dönüştürülür [8].

$d-q$ Sistemi: Bu dönüşüm (Park Dönüşümü), şebekenin faz açısını takip eden bir Faz Kilitleme Döngüsü (PLL) ile senkronize edilir. Bu sayede, şebeke voltajı $d-q$ koordinat sisteminde sabit (DC) büyüklükler olarak görünür. Bu, kontrolörlerin (örneğin PID) d ve q bileşenlerini ayrı ayrı ve hatasız bir şekilde regüle etmesini kolaylaştırır.

Telafi Stratejisi: Hata voltajı belirlendikten sonra, DVR'nin temel kararı, bu hatayı telafi etmek için ne tür bir voltaj enjekte edeceğidir. Telafi, enjekte edilen voltajın genliğini, faz açısını ve süresini kapsar [19].

3.2. Farklı Telafi Modları (Çökme/Yükselme Telafisi, Hassas Yük Beslemesi)

DVR'ler, bozukluğun türüne ve yükün ihtiyacına göre farklı şekillerde telafi yapabilirler:

Voltaj Çökmesi (Sag) Telafisi: DVR, genlik ve faz açısından eksik olan voltajı enjekte ederek V_{yu} 'k'ü nominal değere geri getirir. Bu, en yaygın çalışma modudur.

Voltaj Yükselmesi (Swell) Telafisi: DVR, bu durumda şebeke voltajına zıt fazda (yaklaşık 180 derece faz farkıyla) bir voltaj enjekte ederek aşırı gerilimi düşürür ve V_{yu} 'k'ü stabilize eder.

Dengesiz Voltaj Telafisi: Üç fazdan sadece birinin veya ikisinin çöktüğü durumlarda, DVR kontrol sistemi her faza ayrı ayrı telafi voltajı uygulayarak yük tarafında mükemmel dengelenmiş voltajı sağlar [9].

3.3. Kontrol Algoritmaları

DVR'nin performansını sağlayan temel mekanizmalar, hata voltajını takip eden ve VSI anahtarlarını süren algoritmalarıdır. Şekil 3.1'de PLL, $d-q$ Dönüşümü, Kontrolör, PWM Modülatör adımlarını gösteren şema görülmektedir.



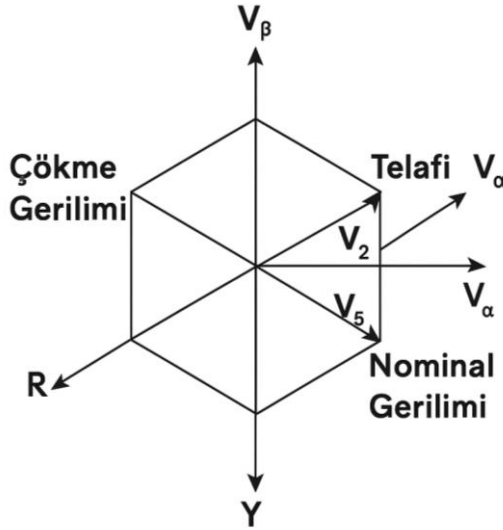
Şekil 3.1: PLL, $d-q$ Dönüşümü, Kontrolör, PWM Modülatör adımlarını gösteren şema

3.3.1. Klasik PID tabanlı kontrol yaklaşımları

Yapı: d-q koordinat sistemindeki voltaj hata sinyalleri, bağımsız PID (Oransal-İntegral-Türevsel) kontrolörlerine beslenir. İntegral bileşen, kararlı durum hatasını sıfıra indirmede kritik rol oynar.

Düşük anahtarlama frekanslarında ve harmonik içeriğin yüksek olduğu durumlarda PID'nin performansı sınırlı olabilmektedir.

Avantaj/Dezavantaj: PID kontrolörleri tasarımları kolay ve anlaşılırdır, ancak yüksek dinamik tepki gerektiren DVR uygulamalarında, kontrolör kazançlarının doğru ayarlanması (tuning) sistem kararlılığı için zorlayıcı olabilir [13]. VSI'nin çıkış voltajını oluşturmak için kullanılan altıgen uzay vektörlerini gösteren diyagram şekil 3.2'de daha net açıklanmaktadır



Şekil 3.2: VSI'nin çıkış voltajını oluşturmak için kullanılan altıgen uzay vektörlerini gösteren diyagram [13]

3.3.2. Uzay Vektör Modülasyonu (SVM)

SVM, VSI'den istenen AC voltajı üretmek için kullanılan gelişmiş bir PWM tekniğidir. Geleneksel sinüzoidal PWM'ye göre daha yüksek bir DC gerilim kullanım faktörü sunar. Ayrıca, anahtarlama frekansı başına daha düşük harmonik bozunumu (THD) üreterek daha temiz bir telafi voltajı sağlar [22].

3.3.3. Gelişmiş ve akıllı kontrol yöntemleri

Model Tahminli Kontrol (MPC): Son yıllarda popülerliği artan bu yöntem, sistemin matematiksel modelini kullanarak VSI'nin olası anahtarlama

durumlarının bir sonraki adımı tahmin eder. En küçük hatayı (veya istenen diğer optimizasyon kriterini) sağlayan anahtarlama durumu seçilir. Hızlı dinamik tepki ve sistem kısıtlamalarını (akım, voltaj limitleri) doğrudan kontrol etme yeteneği nedeniyle DVR'ler için idealdir [22].

Bulanık Mantık ve Yapay Sinir Ağları: Özellikle belirsiz ve doğrusal olmayan şebeke koşullarında kontrolörün performansını artırmak için adaptif özellikler sunar.

3.4. İzole Çalışma Yeteneği ve Senkronizasyon

DVR'nin etkili çalışması, şebeke ile mükemmel senkronizasyona bağlıdır.

Faz Kilitleme Döngüsü (PLL): DVR'nin kontrol sistemi, şebekenin frekansını ve faz açısını hatasız bir şekilde takip etmek için PLL kullanır. PLL, d-q dönüşümünün doğru çalışması ve enjekte edilen telafi voltajının şebekeyle aynı anda olması (veya olması gereken fazda olması) için kritik öneme sahiptir.

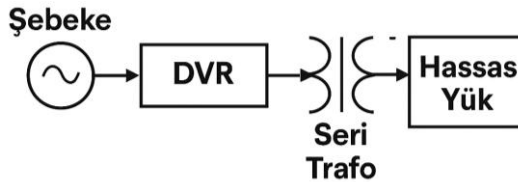
Arıza Durumunda PLL: Voltaj çökmesi veya dengesizlik sırasında şebeke voltajı ciddi şekilde bozulabilir. DVR'nin kontrol sistemleri, bu bozuk koşullarda dahi doğru faz açısını belirlemeye devam edebilen (örneğin, Gelişmiş PLL veya Dengesiz PLL) sağlam algoritmalara sahip olmalıdır [15].

4. DVR UYGULAMA ALANLARI VE PERFORMANS ANALİZİ

DVR'ler, hızları ve hassasiyetleri sayesinde, geleneksel koruma sistemlerinin yetersiz kaldığı alanlarda kritik bir rol oynar. Bu bölüm, DVR'nin temel uygulama alanlarını ve performansını değerlendiren teknik ölçütleri ele almaktadır [19].

4.1. Endüstriyel Tesislerde Uygulamalar

DVR'nin en yaygın ve değerli olduğu alan, milisaniyelik kesintilerin dahi büyük maddi kayıplara yol açtığı endüstriyel ortamlardır. DVR'nin hassas yükü korumak için sistemde nerede konumlandırıldığını gösteren şema şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1.: DVR'nin hassas yükü korumak için sistemde nerede konumlandırıldığını gösteren şema

Yarı İletken ve Elektronik İmalatı: Bu tesisler, elektrik enerjisinin genlik ve frekansındaki en küçük sapmalara karşı aşırı derecede hassastır. Bir voltaj

çökmesi, tüm bir üretim serisinin bozulmasına veya çok pahalı makinelerin yeniden başlatılmasını gerektiren sistem kilitlemelerine neden olabilir. DVR, bu tür olayları anında telafi ederek üretim sürekliliğini sağlar.

Motor Kontrol Sistemleri: Modern endüstride kullanılan Değişken Frekanslı Sürücüler (VFD), voltaj çökmelerine karşı oldukça hassastır. DVR, VFD'leri besleyen voltajı nominal seviyede tutarak, sürücülerin düşük voltaj korumasına geçmesini engeller ve üretim hattının durmamasını garanti eder.

Hassas Kimyasal ve Gıda İşleme: Bu süreçlerdeki kritik pompalar ve karıştırıcılar, sürekli ve kararlı güç gerektirir. Anlık duruşlar, kimyasal reaksiyonları bozabilir veya ürün kalitesini düşürebilir [20].

4.2. Yenilenebilir Enerji Entegrasyonu ve Şebeke Kararlılığı

Büyük ölçekli rüzgâr ve güneş enerjisi santrallerinin (RES/GES) şebekeye bağlanmasıyla, voltaj kararlılığı daha da önem kazanmıştır.

Düşük Voltajda Çalışma (LVRT): Bir şebeke arızası meydana geldiğinde, şebeke bağlantılı yenilenebilir enerji santrallerinin derhal devreden çıkması yerine, kısa bir süre düşük voltaj koşullarında çalışmaya devam etmesi zorunludur. DVR'ler, santralin şebeke bağlantı noktasındaki voltajı regüle ederek, bu LVRT gerekliliklerinin yerine getirilmesine yardımcı olur ve şebeke kararlılığını destekler [17].

4.3. Kritik Altyapılar ve Veri Merkezleri

DVR'ler, hizmet kesintisinin felaket olacağı altyapıları korur. **Veri Merkezleri:** Sürekli operasyon (24/7) gerektiren veri merkezlerinde, DVR, ana UPS sistemleri veya jeneratörler devreye girene kadar geçen kısa sürede dahi voltajı stabilize ederek sistem çökmesini önler. Hastaneler ve Telekomünikasyon: Hayati önem taşıyan bu tesislerde, DVR, şebeke bozukluklarını izole ederek kritik yaşam destek ve iletişim sistemlerinin kesintisiz çalışmasını sağlar [17].

4.4. DVR Performans Parametreleri

DVR'nin etkinliği, aşağıdaki teknik metrikler üzerinden değerlendirilir, Voltaj çökmesi başladığında, DVR'nin ne kadar hızlı tepki verdiğini gösteren dalga formu grafiği de şekil 4.2' de verilmiştir:

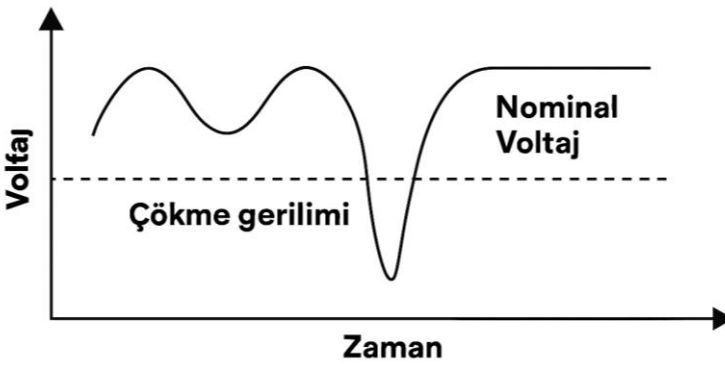
Telafi Süresi (Response Time): DVR'nin bir voltaj bozukluğunu algılaması ve tam telafi voltajını enjekte etmeye başlaması için geçen süredir. Yüksek performanslı sistemlerde bu süre genellikle 1 ila 5 milisaniye arasındadır (bir şebeke periyodundan daha az). Bu, en kritik performans ölçütüdür.

Telafi Kapasitesi: DVR'nin nominal voltajın ne kadar büyük bir kısmını (örneğin, nominal voltajın %40'ına düşen bir çökme) başarıyla telafi

edebileceğini gösterir. Bu, doğrudan DC enerji depolama biriminin boyutuna ve VSI'nin voltaj limitine bağlıdır.

Harmonik Bozunma (THD): DVR telafî voltajını VSI aracılığıyla enjekte ederken, ideal olarak mükemmel bir sinüs dalgası üretmelidir. Telafî sonrası yük voltajındaki Toplam Harmonik Bozunma (THD) yüzdesinin belirlenen standartların (genellikle IEEE 519) altında kalması, DVR'nin kontrol kalitesini gösterir.

Verimlilik: DVR'nin sürekli çalışma durumunda (telafî yapmadığı zamanlarda bile) kendi kaybettiği güç miktarıdır. Yüksek verimlilik, operasyonel maliyetleri düşürür ve ısı dağılımı gereksinimlerini azaltır [1].



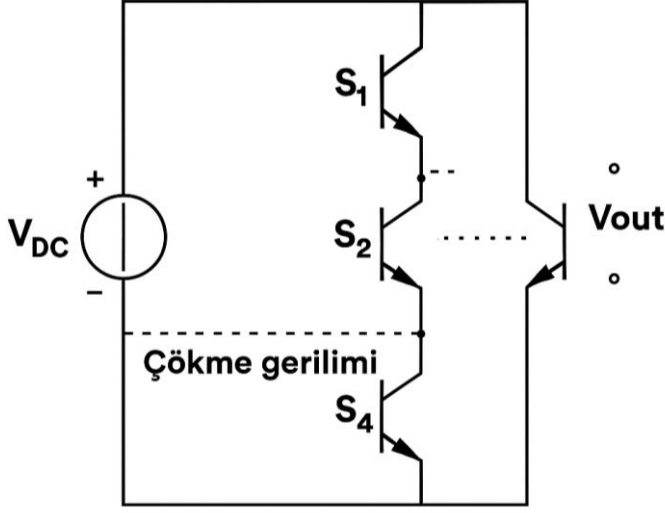
Şekil 4.2: Voltaj çökmesi başladığında, DVR'nin ne kadar hızlı tepki verdiğini gösteren dalga formu grafiği

5. GÜNCEL ARAŞTIRMA KONULARI VE GELECEK TRENDLERİ

Dinamik Voltaj Regülatörleri olgun bir teknoloji olmasına rağmen, maliyeti düşürmek, verimliliği artırmak ve şebeke entegrasyonunu kolaylaştırmak için sürekli olarak araştırma ve geliştirme yapılmaktadır. Bu bölüm, alandaki en aktif araştırma konularına odaklanmaktadır [7].

5.1. Çok Seviyeli İnverter Tabanlı DVR Tasarımları

Geleneksel DVR'ler genellikle iki seviyeli Voltaj Kaynağı İnvertörleri (VSI) kullanır. Ancak yüksek güçlü ve yüksek gerilimli uygulamalarda (örneğin iletim ve büyük dağıtım şebekelerinde), bu yapının yerini Çok Seviyeli İnvertörler (MLI) almaktadır. Şekil 5.1' de Kaskat H Köprüsü gibi bir Çok Seviyeli İnvertörün temel hücre yapısını detaylı bir şekilde göstermektedir.



Şekil 5.1: Kaskat H Köprüsü gibi bir Çok Seviyeli İnvertörün temel hücre yapısını gösteren detaylı devre şeması

Gerekliklik ve Avantajlar: MLI' lar, DC voltajı birden fazla seviyede anahtarlayarak çıkış voltaj dalga formunu mükemmel bir sinüs dalgasına daha yakın hale getirir. Bu, aşağıdaki kritik avantajları sağlar:

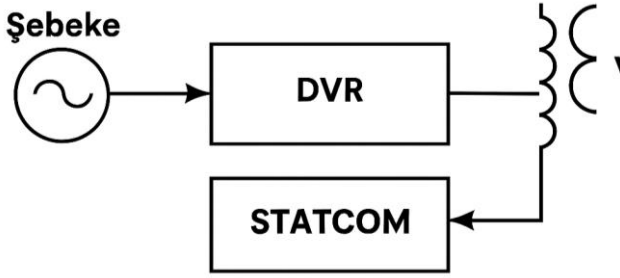
Daha Düşük Harmonik Bozulma (THD): Çıkış voltajındaki harmonik içeriği azaltır, bu da daha küçük ve daha ucuz filtreleme bileşenleri kullanılmasına olanak tanır.

Daha Az Voltaj Stresi: İnvertör anahtarları üzerindeki voltaj stresini azaltarak cihazın güvenilirliğini artırır.

Modüler Yapı: Özellikle Kaskat H Köprüsü (CHB) topolojisi, DVR'nin gerilim kapasitesinin kolayca ölçeklenmesine ve modüllerden biri arızalandığında bile kısmi çalışmaya devam etmesine (arıza toleransı) olanak tanır [4].

5.2. Hibrit Voltaj Regülatör Sistemleri

DVR'ler voltaj kalitesinde mükemmeldir, ancak şebekede aynı anda meydana gelen farklı güç kalitesi sorunlarını (örn. uzun süreli gerilim dalgalanmaları ve reaktif güç ihtiyacı) tek başlarına yönetmekte zorlanabilirler. Bu nedenle, DVR'nin diğer güç elektroniği cihazlarıyla entegrasyonu önemli bir araştırma alanıdır. DVR ve STATCOM gibi farklı FACTS cihazlarının birleşimini gösteren blok diyagramı şekil 5.2'de görülmektedir.



Şekil 5.2: DVR ve STATCOM gibi farklı FACTS cihazlarının birleşimini gösteren blok diyagramı

DVR + STATCOM (Hibrit DVR- HDVR): DVR'nin hızlı sag/swell telafi yeteneği ile Statik Senkron Kompanzatör'ün (STATCOM) sürekli reaktif güç desteği ve güç faktörü düzeltme yeteneği birleştirilir. Bu hibrit sistemler, tek bir cihazdan daha geniş bir şebeke bozukluğu yelpazesine karşı koruma sağlar.

Enerji Paylaşımı: Hibrit sistemler, güç elektroniği bileşenlerini paylaşarak toplam kurulum maliyetini düşürme potansiyeli sunar [16].

5.3. Maliyet Optimizasyonu ve Ticari Çözümler

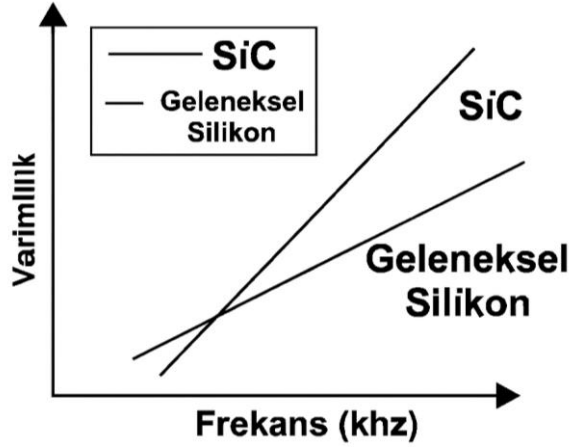
DVR'nin yaygınlaşmasının önündeki en büyük engellerden biri, özellikle yüksek güçlü enerji depolama birimlerinin (akü/süperkapasitör) ve güç elektroniği anahtarlarının yüksek maliyetidir.

Enerjisiz (Active-Standby) DVR'ler: Geleneksel DVR'ler, telafi için aktif enerjiye (P) ihtiyaç duyar. Ancak bazı yeni tasarımlar, arıza anında aktif gücü sadece reaktif güç enjekte ederek veya şebekeden çok kısa süreliğine sınırlı aktif güç çekerek (kendi kendine iyileşen sistemler) telafi etmeye odaklanır. Bu yaklaşımlar, pahalı ve büyük DC depolama birimlerinin boyutunu dramatik şekilde küçülterek maliyeti optimize etmeyi hedefler.

Yeni Topolojiler: Daha az yarı iletken anahtar gerektiren veya seri trafonun boyutunu küçülten yeni bağlantı şemaları (örneğin matris dönüştürücüler tabanlı) araştırılmaktadır [5].

5.4. Sürücü Devreleri ve Yarı İletken Teknolojilerindeki Yenilikler

DVR performansını fiziksel düzeyde dönüştüren, yeni nesil güç yarı iletken malzemeleridir. Bu malzemeler, şekil 5.3'te Silikon Karbür (SiC) ve geleneksel Silikon'un anahtarlama frekansı ve verimlilik açısından üstünlüğünü gösteren grafik ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.3: Silikon Karbür (SiC) ve geleneksel Silikon'un anahtarlama frekansı ve verimlilik açısından üstünlüğünü gösteren grafik

Geniş Bant Aralığı (WBG) Yarı İletkenler: Silikon Karbür (SiC) ve Galyum Nitrür (GaN) bazlı anahtarlama cihazları, geleneksel Silikon (Si) tabanlı IGBT'lere göre çok daha yüksek frekanslarda ve sıcaklıklarda çalışabilir. Bu özellikler DVR tasarımını kökten değiştirir:

Daha Hızlı Tepki: Daha yüksek anahtarlama frekansı, kontrol sisteminin daha hızlı hareket etmesini ve daha düşük anahtarlama kayıplarıyla daha temiz dalga formları üretmesini sağlar.

Boyut ve Ağırlık Azalması: Yüksek frekansta çalışabilme yeteneği, DVR'deki pasif bileşenlerin (filtre bobinleri ve kapasitörler) fiziksel boyutunu ve ağırlığını önemli ölçüde azaltır.

Gelişmiş Kontrol Entegrasyonu: Daha güçlü ve hızlı işlemciler (FPGA ve yüksek hızlı DSP'ler), Model Tahminli Kontrol (MPC) gibi karmaşık ve hesaplama açısından yoğun algoritmaların saniyeden daha kısa sürelerde güvenilir bir şekilde uygulanmasını sağlar [2].

6. SONUÇ

Bu kitap bölümü, Dinamik Voltaj Regülatörlerinin (DVR) temel prensiplerinden başlayarak güncel araştırma eğilimlerine kadar uzanan kapsamlı bir incelemesini sunmuştur.

6.1. Bölümün Özeti ve Temel Çıkarımlar

DVR'ler, modern güç sistemlerinin artan güç kalitesi taleplerine bir yanıt olarak ortaya çıkmıştır. Temel olarak, şebeke ve kritik yük arasında seri olarak bağlanan DVR, en yıkıcı güç kalitesi olayları olan voltaj çökmelerini (sag) ve yükselmelerini (swell), milisaniyeler düzeyinde bir tepki hızıyla telafi eder [8].

Bölümde ele alınan temel çıkarımlar şunlardır:

1. Hız ve Hassasiyet: DVR'ler, geleneksel voltaj regülasyon yöntemlerine kıyasla benzersiz bir dinamizm sunar. Bu, özellikle hassas endüstriyel makineler ve veri merkezleri gibi kritik yüklerin üretim sürekliliğini korumak için hayati önem taşır.
2. Kontrolün Önemi: DVR'nin etkinliği, büyük ölçüde d-q koordinat dönüşümüne dayanan hızlı hata algılama ve Model Tahminli Kontrol (MPC) gibi gelişmiş kontrol algoritmalarına bağlıdır.
3. Geniş Uygulama Alanı: DVR'ler, sadece endüstriyel tesislerde değil, aynı zamanda yenilenebilir enerji santrallerinin LVRT (Düşük Voltajda Çalışma) gereksinimlerini karşılamada ve kritik altyapıları korumada da merkezi bir rol oynamaktadır.

6.2. Alandaki Açık Sorunlar ve Gelecek Araştırma Yönleri

DVR teknolojisi olgunlaşmış olsa da potansiyelini tam olarak ortaya çıkarmak için aşılması gereken bazı zorluklar ve aktif araştırma alanları bulunmaktadır:

Maliyet ve Boyut Optimizasyonu: DVR'lerin yaygın adaptasyonunun önündeki en büyük engel, özellikle uzun süreli telafi için gereken DC enerji depolama birimlerinin (akü/süperkapasitör) ve güç elektroniği bileşenlerinin yüksek maliyeti ve fiziksel boyutudur. Gelecek araştırmalar, enerjisiz (active-standby) telafi stratejilerine ve daha az bileşenle aynı performansı sağlayan yeni topolojilere odaklanmalıdır.

İleri Yarı İletkenlerin Entegrasyonu: Silikon Karbür (SiC) ve Galyum Nitrür (GaN) gibi geniş bant aralıklı (WBG) yarı iletkenlerin VSI'lere entegrasyonu, daha yüksek anahtarlama frekansları ve verimlilik sayesinde cihazların boyutunu küçültme ve performansını artırma potansiyeli taşımaktadır.

Şebeke Entegrasyonu ve Hibrit Sistemler: Geleceğin DVR'leri, sadece yükü korumakla kalmayıp, aynı zamanda STATCOM gibi diğer FACTS cihazlarıyla birleşerek Hibrit DVR (HDVR) sistemlerini oluşturacak ve böylece şebekeye daha kapsamlı voltaj ve reaktif güç desteği sağlayarak akıllı şebeke (Smart Grid) kararlılığına aktif olarak katkıda bulunacaktır.

Sonuç olarak, Dinamik Voltaj Regülatörleri, hızla dijitalleşen ve güç kalitesine olan bağımlılığı artan dünyamızda vazgeçilmez bir çözüm olmaya devam edecektir [11].

7. KAYNAKÇA

- Ahmed, H. F., El Moursi, M. S., Cha, H., Al Hosani, K., & Zahawi, B. (2020). A reliable single-phase bipolar buck-boost direct PWM AC-AC converter with continuous input/output currents. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(12), 10253–10265.
- Arya, S. R., Maurya, R., & Naidu, T. A. (2018). Amplitude adaptive notch filter with optimized PI gains for mitigation of voltage based power quality problems. *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, 3(4), 313–323. <https://doi.org/10.24295/CPSSTPEA.2018.00031>
- Bakir, H., & Kulaksiz, A. A. (2019). Modelling and voltage control of the solar-wind hybrid micro-grid with optimized STATCOM using GA and BFA. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.07.009>
- Balasubramanian, G. (2016). Design and Implementation of Dynamic Voltage Restorer for Voltage Sag Mitigation.
- Biricik, S., Komurcugil, H., Ahmed, H., & Babaei, E. (2021). Super Twisting sliding-mode control of DVR with frequency-adaptive brockett oscillator. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(11), 10730–10739.
- Gandoman, F. H., Ahmadi, A., Sharaf, A. M., Siano, P., Pou, J., Hredzak, B., & Agelidis, V. G. (2018). Review of FACTS technologies and applications for power quality in smart grids with renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 502–514. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.062>
- He, J., Liang, B., Li, Y. W., & Wang, C. (2017). Simultaneous microgrid voltage and current harmonics compensation using coordinated control of dual-interfacing converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(4), 2647–2660.
- Jamshidi, A., Ghahderijani, M. M., & Barakati, S. M. (2012). Power quality improvement in stand-alone microgrid including fixed-speed wind farm: Role of dynamic voltage restorer. *2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering*.
- Karthikeyan, A., Krishna, D. G. A., Kumar, S., Perumal, B. V., & Mishra, S. (2019). Dual role CDSC-based dual vector control for effective operation of DVR with harmonic mitigation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(1), 4–13.
- Khan, U. A., Yang, H. K., Khan, A. A., & Park, J. W. (2021). Design and implementation of novel noninverting buck-boost AC-AC converter for

- DVR applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(10), 9346–9357.
- Khanh, B. Q. (2019). On Optimally Positioning a Multiple of Dynamic Voltage Restorers in Distribution System for Global Voltage Sag Mitigation. *2019 IEEE Asia Power and Energy Engineering Conference (APEC)*.
- Li, P., Xie, L., Han, J., Pang, S., & Li, P. (2017). New decentralized control scheme for a dynamic voltage restorer based on the elliptical trajectory compensation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(8), 6484–6495.
- Li, P., Xie, L., Han, J., Pang, S., & Li, P. (2018). A new voltage compensation philosophy for dynamic voltage restorer to mitigate voltage sags using three-phase voltage ellipse parameters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(2), 1154–1166.
- Naidu, T. A., Arya, S. R., & Maurya, R. (2019a). Dynamic voltage restorer with quasi-Newton filter-based control algorithm and optimized values of PI regulator gains. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 7(4), 2476–2485.
- Pandu, S. B., & Nagappan, K. (2015). A Novel Multiobjective Control of DVR to Enhance Power Quality of Sensitive Load. *ScientificWorldJournal*, 2015, 385109. <https://doi.org/10.1155/2015/385109>
- Patel, D., Goswami, A. K., & Singh, S. K. (2015). Voltage sag mitigation in an Indian distribution system using dynamic voltage restorer. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 71, 231–241. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.03.001>
- Poon, J., Sinha, M., Dhople, S. V., & Rivas-Davila, J. (2022). Real-time selective harmonic minimization using a hybrid analog/digital computing method. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(5), 5078–5088.
- Praveena, A., & Jayashree, M. (2014). Mitigation of Voltage SAG using Dynamic Voltage Restorer. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 3(4).
- Sachin Y. S., M., & T. (2014). Modeling and simulation of dynamic voltage restorer for voltage sag mitigation in distribution system. *International Journal of Recent Research and Review*, 7(4).
- Sadollah, A., Eskandar, H., Lee, H. M., Yoo, D. G., & Kim, J. H. (2016). Water cycle algorithm: A detailed standard code. *SoftwareX*, 5, 37–43. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2016.03.001>
- Wang, J., Xing, Y., Wu, H., & Yang, T. (2019). A novel dual-DC-Port dynamic voltage restorer with reduced-rating integrated DC-DC converter for wide-

- range voltage sag compensation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(8), 7437–7449.
- Wang, Y., et al. (2022). A forward compensation method to eliminate DC phase error in SRF-PLL. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(6), 6280–6284.
- Zhang, H., Xiao, G., Lu, Z., & Chai, Y. (2022). Reduce response time of single-phase dynamic voltage restorer (DVR) in a wide range of operating conditions for practical application. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 10(2), 2101–2113.



BÖLÜM 19

Derin Öğrenme ile Akıllı Sağlık Sistemleri Klinik Destek, Görüntüleme ve Tahmin Modelleri

Nisa Vuran Sarı¹ & Gizen Mutlu²

1. GİRİŞ

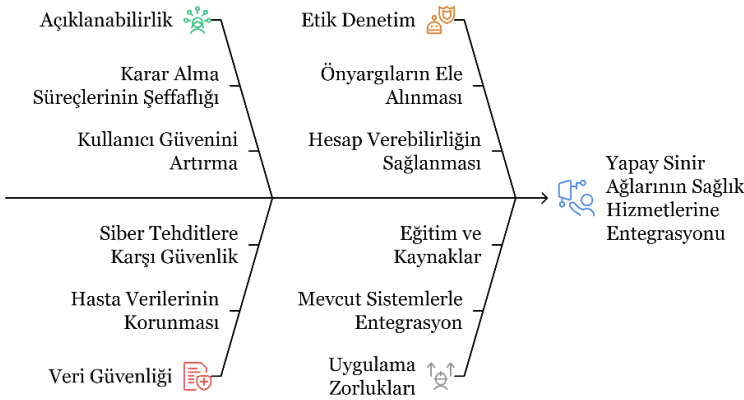
Yapay zekâ teknolojilerinin sağlık alanındaki yükselişi, özellikle Yapay Sinir Ağları (YSA) gibi derin öğrenme temelli yaklaşımlar sayesinde büyük ivme kazanarak günümüzde sağlık bilişiminin ve klinik karar destek sistemlerinin vazgeçilmez birer parçası olma yolunda emin adımlarla ilerlemektedir. Bu kitap bölümünde, YSA'ların sağlık hizmetlerindeki dönüştürücü rolü Klinik Destek ve İlaç Geliştirme, Görüntü İşleme, Yoğun Bakım ve Kardiyak Tahmin, Beyin Tümörü ve Sinir Cerrahisi, Kas-İskelet ve Spinal Sistem ve Epilepsi ve Nöbet Tahmini olmak üzere altı farklı kategoride ele alınmış olup, son beş yılda yayımlanmış öncü bilimsel makaleler ışığında incelenmiştir. İncelenen çalışmalar, epileptik nöbetlerin EEG sinyalleri üzerinden öngörülmesi, yoğun bakım hastalarının hayatta kalma olasılıklarının tahmini, kas-iskelet ve omurilik yaralanmalarının prognozu gibi farklı klinik senaryolarda YSA'nın nasıl uygulandığını ortaya koymaktadır (Li vd., 2025; Dong vd., 2024; Tamburella vd., 2024). Özellikle konvolüsyon sinir ağı (Convolutional Neural Network, CNN), Tekrarlayan Sinir Ağı (Recurrent Neural Network, RNN), Çekişmeli Üretici Ağ (Generative Adversarial Network, GAN) ve Transformer tabanlı hibrit modeller gibi gelişmiş mimarilerin kullanıldığı örneklerde, YSA'ların geleneksel istatistiksel yöntemleri çoğu durumda geride bıraktığı görülmektedir. YSA'nın yüksek hacimli, çok boyutlu ve karmaşık sağlık verilerini analiz edebilme kabiliyeti, bu teknolojilerin hem erken tanı hem de kişiselleştirilmiş tedavi planlamalarında etkili olmasını sağlamaktadır (Johnsson vd., 2020; Qiu vd., 2023). Ayrıca tıbbi görüntü işleme alanında yapılan çalışmalar, derin öğrenme mimarilerinin tümör tespiti ve segmentasyon gibi görevlerde uzman

¹ Arş. Gör., Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği
ORCID: 0000-0001-7042-3031

² Arş. Gör., Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği
ORCID: 0000-0001-7553-2077

performansına yakın veya daha üstün sonuçlar sunduğunu göstermektedir (Abut vd., 2024; Hansen vd., 2024).

Bununla birlikte, Şekil-1’de sunulduğu gibi YSA tabanlı sistemlerin klinik uygulamalara entegrasyonunda açıklanabilirlik, veri güvenliği ve etik denetim gibi alanlarda hâlâ çözüm bekleyen sorunlar bulunmaktadır.



Şekil 1. Sağlık Hizmetlerinde YSA Entegrasyonunun Zorlukları.

Tüm bu güçlüklerle rağmen, eldeki kanıtlar ve süregelen araştırmalar, YSA’ların sağlık bilişimi ekosisteminin geleceğinde giderek daha merkezi bir rol üstleneceğini net bir şekilde göstermektedir. Bu bölümdeki her bir makale, YSA'nın sağlık alanındaki çok boyutlu etkisini anlamaya yönelik derinlemesine bir bakış sunarak, bu alanda gerçekleştirilecek lisansüstü çalışmalara ve yenilikçi projelere bilimsel bir zemin hazırlamayı amaçlamaktadır.

2. LİTERATÜR

2.1. Epilepsi ve Nöbet Tahmini

Derin öğrenme modelleri ile epileptik nöbetlerin EEG sinyalleri üzerinden tespitinde kayda değer başarılar elde edilmiş olsa da, bu alandaki araştırmaların önünde iki temel zorluk durmaktadır: modellerin yüksek hesaplama maliyetleri ve nöbet anını içeren EEG verilerinin azlığı nedeniyle ortaya çıkan aşırı uyum riski. Bu temel sorunlara çözüm bulma hedefiyle yola çıkan (Li vd., 2024), CNN-Informer adını verdikleri hibrit ve uçtan uca bir derin öğrenme modeli sunmuşlardır. Bu yaklaşım ile iki güçlü mimariyi bir araya getirerek her birinin avantajından faydalanmışlardır. Modelin ilk katmanı olan CNN, çok kanallı EEG sinyallerindeki yerel ve uzamsal özellikleri etkili bir şekilde çıkarmak için

kullanılmış olup, Transformer tabanlı bir mimari olan Informer katmanı devreye alınmıştır. Informer ile CNN'den gelen bu özellikler arasındaki uzun vadeli zamansal bağımlılıkları, geleneksel Transformer modellerine kıyasla çok daha düşük bir hesaplama yükü ve bellek kullanımıyla yakalamışlardır. Yazarlar, ham EEG verilerinde sıkça rastlanan gürültü ve artefaktların model performansını olumsuz etkilememesi için, verileri CNN-Informer modeline beslemeden önce Ayrık Dalgacık Dönüşümü (Discrete Wavelet Transform, DWT) kullanarak bir filtreleme adımından geçirmişlerdir. Bu ön işleme adımı, sinyalin özünü korurken parazitleri azaltarak modelin daha temiz veriyle eğitilmesini sağlamıştır. Modelin sınıflandırma sonuçları, nihai tespitin hassasiyetini artırmak amacıyla ek bir son işlem aşamasıyla daha da rafine edilmiştir. Geliştirilen bu yaklaşımın etkinliği, alanda standart olarak kabul edilen CHB-MIT ve SH-SDU adlı iki farklı kamuya açık veri kümesi üzerinde kapsamlı bir şekilde doğrulanarak, CNN-Informer modelinin hem segment bazlı hem de olay bazlı değerlendirme kriterlerine göre mevcut son teknoloji yöntemlerden daha üstün sonuçlar verdiğini göstermişlerdir. Çalışmanın en dikkat çekici bulgularından biri ise, modelin sadece yüksek doğruluk sunmakla kalmayıp, aynı zamanda farklı veri setleri arasında tutarlı bir performans sergileyerek güçlü bir genelleme yeteneğine sahip olmasıdır. Dahası, CNN-Informer'ın hafif mimarisi, onu giyilebilir teknolojiler gibi kaynak kısıtlı platformlarda dahi gerçek zamanlı nöbet tespiti için oldukça uygun ve pratik bir çözüm haline getirmektedir.

Epileptik nöbetlerin öngörülmesine yönelik çalışmalarda, ham EEG sinyallerinin doğrudan işlenmesinin ötesine geçerek, sinyalin altında yatan dinamik özellikleri daha zengin bir formatta temsil etmeye yaklaşımlar arasında, sinyalin zamana bağlı frekans değişimlerini görselleştiren zaman-frekans analiz yöntemleri, derin öğrenme modelleri için verimli bir zemin sunmaktadır. Bu stratejiyi uygulayan güncel bir çalışmada (Dong vd., 2024), nöbetlerin erken tahmini için CNN tabanlı bir model sunmuşlardır. Nöbet tahmininde aşırı uyum (overfitting) ve derin öğrenme ağlarının giderek artan hesaplama karmaşıklığını çözmek adına, sinyal işleme tekniklerini ve en yeni Transformer mimarilerini birleştiren (Dong vd., 2024) çalışmada sunulmuştur. Bu çalışma hem model verimliliğini hem de gürültüye karşı dayanıklılığı artırmayı hedefleyen bütüncül bir yaklaşım sergilemektedir. Modelin ilk aşamasında, çok kanallı EEG sinyallerinin zaman-frekans alanındaki zengin ve dinamik yapısını ortaya çıkarmak için Stockwell Dönüşümü kullanılarak elde edilen yüksek çözünürlüklü spektrogramlar, sinyaldeki anlık değişimleri ve desenleri, derin öğrenme modelinin daha rahat işleyebileceği bir görüntü formatına taşır. Çalışmanın asıl yeniliği ise bu spektrogramları işlemek için özel olarak tasarlanmış, hafif bir Çok

Kanallı Görüntü Dönüştürücüsü (Multichannel Vision Transformer, MViT) modelinin kullanılmasıdır. Geleneksel derin ağların aksine bu mimari ile minimum sayıda katmanla mekansal özellikler verimli bir şekilde ayırt edilmiştir. Bu sayede hem sistemin hesaplama yükü azalmış, hem de daha az veriyle eğitimeye yatkın olan bu tür modellerdeki aşırı uyum riski önemli ölçüde düşürülmüştür. Ayrıca, EEG verilerinin sürekli akışından kaynaklanabilecek anlık ve hatalı tahminleri filtrelemek amacıyla, bir son işleme adımı olarak "K-of-N" stratejisi uygulanmıştır. Bu teknik, modelin belirli bir zaman penceresindeki tahminlerini bütüncül olarak değerlendirerek sistemin genel güvenilirliğini ve kararlılığını artırmıştır. Modelin performansı, yaygın olarak kullanılan CHB-MIT ve klinik SH-SDU veri tabanları üzerinde test edilmiş ve sırasıyla %97,57 ve %95,88 gibi son derece yüksek segment bazlı doğruluk oranları elde edilmiştir.

2.2. Kas-İskelet ve Spinal Sistem

Omurilik Yaralanması (OMY) gibi karmaşık ve heterojen klinik tablolarda, hastanın gelecekteki fonksiyonel kazanımlarını doğru bir şekilde tahmin etmek, hem tedavi planlaması hem de kaynak yönetimi açısından kritik bir zorluktur. Geleneksel istatistiksel modellerin bu karmaşık ilişkileri modellemede yetersiz kalabildiği durumlarda, YSA gibi daha esnek yaklaşımların potansiyeli giderek daha fazla araştırılmaktadır. Bu alandaki önemli bir çalışmada, (Tamburella vd., 2024), OMY sonrası rehabilitasyon sonuçlarını tahmin etmede YSA ile standart doğrusal regresyon modellerinin performansını karşılaştırmıştır. 1,256 OMY hastasından oluşan geniş bir veri kümesi üzerinde yürütülen çalışmada, her iki model de başlangıçta hastanın yaşı, yaralanmanın seviyesi ve başlangıçtaki fonksiyonel durumu (SCIM skoru) gibi temel faktörleri, nihai sonuçların önemli öngörücüleri olarak doğru bir şekilde tanımlamışlardır. Fakat yalnızca bu temel veriler kullanıldığında, YSA ve doğrusal regresyon modelleri neredeyse benzer bir performans sergilemiştir (gerçek sonuçlarla korelasyon katsayıları sırasıyla $R=0,75$ ve $R=0,73$). Bu bulgu ile, doğrusal ilişkilerin baskın olduğu senaryolarda geleneksel yöntemlerin gücünü koruduğunu göstermişlerdir. Ancak rehabilitasyon sürecinde ortaya çıkan ek veriler modele dahil edildiğinde hastanın yatışı sırasında yaşanan komplikasyonlar (örneğin solunum sorunları, derin ven trombozu, ürolojik komplikasyonlar) gibi dinamik ve karmaşık faktörlerin analizinde, YSA modelinin üstünlüğünü belirginleştirmişlerdir. YSA, bu değişkenler arasındaki doğrusal olmayan ve karmaşık etkileşimleri hesaba katarak tahmin doğruluğunu önemli ölçüde artırmış ve korelasyon katsayısını $R=0,87$ 'ye yükseltmiştir. Bu durum, YSA'nın yalnızca bir tahmin aracı olmanın

ötesinde, klinisyenlere hangi ikincil faktörlerin iyileşme sürecini en çok etkilediğini göstermiştir.

Aghazadeh vd. (2020), manuel malzeme taşıma aktiviteleri sırasında omurga yaralanma riskini değerlendirmek için karmaşık ve zaman alıcı laboratuvar ölçümlerine alternatif olarak kullanılabilecek pratik bir yöntem geliştirmeyi amaçlamıştır. Bu çalışma, 3D tam vücut duruşunu (YSA posture), segmental oryantasyonları (YSA angle) ve lumbosakral momentleri (YSA moment) tahmin etmek için birbirine bağlı YSA modelleri oluşturmuştur. Araştırmada, 15 katılımcının farklı ağırlık ve konumlardaki 135 yük taşıma aktivitesi sırasında hareket yakalama sistemiyle elde edilen veriler kullanılmıştır. Bu verilerle eğitilen YSA'lar, daha sonra araştırmacıların önceki bir çalışmasında geliştirdiği ve omurga yüklerini tahmin eden bir başka YSA birleştirilmiştir. Modelin genelleme performansı test edildiğinde, duruş tahmini için $R^2=0.97$ ve 7.0 cm'lik bir Kök Ortalama Kare Hata (RMSE), lumbosakral momentler için ise $R^2=0.97$ ve 16.5 Nm'lik bir RMSE değeri elde edilmiştir. En önemlisi, birleştirilmiş YSA modelinin L4-L5 intradiskal basınç (IDP) tahminleri, literatürdeki ölçülmüş IDP verileriyle karşılaştırıldığında $R^2=0.89$ gibi yüksek bir uyum göstermiştir (RMSE=0.37 MPa). Bu sonuçlar, geliştirilen birleşik YSA modellerinin, duruşu, lumbosakral momentleri ve omurga yüklerini laboratuvar ekipmanına ihtiyaç duymadan, sahada hızlı ve güvenilir bir şekilde değerlendirmek için sağlam ve pratik bir araç olduğunu kanıtlamaktadır.

Hosseini ve Arjmand (2024), daha önce statik duruşları temel alarak geliştirdikleri bir YSA modelinin, dinamik kaldırma aktiviteleri sırasındaki tam vücut duruşunu tahmin etme yeteneğini ve bu tahmin hatalarının omurga yükleri üzerindeki etkilerini araştırmayı amaçlamıştır. Çalışmada, yedi katılımcının yirmi beş farklı dinamik kaldırma görevini gerçekleştirmesi sırasında, 10 kameralı bir Vicon hareket yakalama sistemiyle tam vücut duruşları ölçülmüştür. Aynı zamanda, eldeki yükün zamana bağlı pozisyon bilgileri YSA modeline girdi olarak verilerek duruşlar tahmin edilmiştir. Ölçülen ve tahmin edilen duruşlar (39 cilt işaretçisinin koordinatları) ile bu duruşlara dayalı olarak tahmin edilen L5-S1 omurga yükleri karşılaştırılmıştır. Model, dinamik duruşları yüksek bir doğrulukla tahmin etmiş; tahmin edilen ve ölçülen duruşlar arasındaki genel Kök Ortalama Kare Hata (RMSE) 7.4 cm ve R^2 değeri 0.98 olarak bulunmuştur ($p<0.05$). Duruş tahminindeki bu hataların, deneklere özgü kas-iskelet modelleriyle hesaplanan L5-S1 yükleri üzerindeki etkisi genellikle düşük kalmıştır; normalleştirilmiş RMSE değeri %10'dan az bulunmuştur ($R^2>0.7$). Sonuç olarak, statik aktivitelere dayalı olarak geliştirilmiş olan bu YSA modelinin, dinamik kaldırma aktiviteleri sırasında da duruşu doğru bir şekilde

tahmin edebildiği ve bu tahminlerin kas-iskelet modellemelerinde güvenilir bir şekilde girdi olarak kullanılabileceği gösterilmiştir.

2.3. Görüntü İşleme

Kan sayımı ve özellikle beyaz kan hücrelerinin (WBC) tiplerine göre ayrıştırılması (diferansiyel sayım), hematolojik hastalıkların tanısında temel bir adımdır. Geleneksel bilgisayar destekli sistemler, bu süreci otomatikleştirmek için genellikle ön işleme, segmentasyon ve özellik çıkarma gibi çok adımlı ve zahmetli görüntü işleme tekniklerine dayanır. Ancak bu yöntemler, özellikle hücrelerin üst üste bindiği veya kısmen görüldüğü durumlarda önemli performans düşüşleri yaşayabilmektedir. Bu zorlukların üstesinden gelmek amacıyla (Kutlu vd., 2020), derin öğrenmenin desen tanıma yeteneklerinden faydalanan önemli bir çalışma sunmuşlardır. Yazarlar, geleneksel yaklaşımlardan ayrılarak, nesne tespiti ve sınıflandırmasını eş zamanlı olarak gerçekleştirebilen Bölgesel Tabanlı CNN (Region Based CNN, R-CNN) mimarisini kullanmışlardır. Bu yaklaşım, sadece bir görüntüde hangi hücre tipinin olduğunu söylemekle kalmaz, aynı zamanda her bir hücrenin yerini de hassas bir şekilde belirler. Modelin temelini oluşturan özellik çıkarıcı katman için AlexNet, VGG16, GoogLeNet ve ResNet50 gibi farklı derin öğrenme mimarileri ile transfer öğrenme tekniğini uygulayarak kapsamlı bir şekilde test etmişlerdir. İki farklı veri setinin birleşimiyle eğitilen ve test edilen sistemin sonuçları oldukça başarılıdır. Geliştirdikleri model, beyaz kan hücrelerini tespit etmede %100'lük kusursuz bir başarı göstermiştir. Sınıflandırma performansında ise en iyi sonuçları, transfer öğrenmesi ile eğitilen ResNet50 mimarisi vermiştir. Bu model, Lenfositleri %99,52, Monositleri %98,40 ve diğer hücre tiplerini de benzer şekilde yüksek doğruluk oranlarıyla sınıflandırmayı başarmıştır. Bu çalışma, R-CNN tabanlı derin öğrenme modellerinin, geleneksel yöntemlerin aksine, kısmen gizlenmiş hücreleri bile tanıyabildiğini ve hematoloji alanında daha hızlı, daha doğru ve tam otomatik analiz sistemleri geliştirme yolunda ne denli güçlü bir potansiyele sahip olduğunu somut bir şekilde kanıtlamaktadır.

Derin öğrenme mimarilerinin çeşitli zorluklara yönelik bir çözüm de (Toğaçar vd., 2020) tarafından sunulan ve derin öğrenme ile geleneksel makine öğrenmesi modellerinin en güçlü yönlerini birleştiren hibrit bir yaklaşımda ortaya konulmuştur. Bu çalışmada, zatürre teşhisi için akciğer röntgeni görüntüleri analiz edilmiştir. Araştırmacılar, saf bir derin öğrenme sınıflandırıcısı kullanmak yerine, AlexNet, VGG-16 ve VGG-19 gibi kendini kanıtlamış derin öğrenme mimarilerini birer derin özellik çıkarıcı olarak kullanmışlardır. Bu strateji, modellerin görüntülerden zengin ve hiyerarşik desenleri öğrenme yeteneğinden faydalanmayı amaçlamaktadır. Çalışmanın ayırt edici yönü ise, bu modellerden

elde edilen binlerce özelliği doğrudan bir sınıflandırıcıya vermek yerine, önce akıllı bir özellik seçimi adımından geçirmeleridir. Bu amaçla, Minimum Yedeklilik Maksimum Alaka (Minimum Redundancy Feature Selection, mRMR) algoritması kullanılarak her bir CNN modelinden çıkarılan binlerce özellik arasından en bilgilendirici ve en az gerekli olan 100 tanesini seçmişlerdir. Ardından bu seçkin özellikler birleştirilerek toplam 300 özellikten oluşan optimize edilmiş bir özellik seti oluşturulmuştur. Bu son ve rafine özellik seti, Karar Ağaçları, Destek Vektör Makineleri ve Doğrusal Ayırıcı Analiz (Latent Dirichlet Allocation, LDA) gibi daha az hesaplama yükü gerektiren klasik makine öğrenmesi modelleriyle test edilmiştir. Sonuçlar, bu hibrit yaklaşımın ne kadar etkili olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle LDA modeli, %99,41 gibi olağanüstü bir doğruluk oranına ulaşarak en başarılı sınıflandırıcı olmuştur. Bu çalışma, iki önemli noktayı ortaya koymuştur: Birincisi, derin öğrenme modellerinin güçlü birer özellik çıkarıcı olarak kullanılabileceği; ikincisi ise mRMR gibi özellik seçimi algoritmalarının, bu derin özellikleri daha verimli ve yönetilebilir hale getirerek, geleneksel makine öğrenmesi modelleriyle dahi üstün sonuçlar elde edilmesini sağlayabileceğidir.

Beyaz kan hücrelerinin otomatik sınıflandırılmasına yönelik sistemlerde, doğruluk ve hesaplama verimliliği arasında bir denge kurmak, araştırmacıların temel hedeflerinden biridir. Uçtan uca derin öğrenme modelleri yüksek doğruluk sunsa da eğitim süreleri ve kaynak gereksinimleri önemli bir zorluk teşkil edebilir. Buna yönelik bir çözüm, (Özyurt, 2019) tarafından sunulan ve derin öğrenmenin özellik çıkarma gücünü, hızlı ve verimli sınıflandırıcılarla birleştiren çok aşamalı bir modelde ortaya konulmuştur. Bu çalışmada, öncelikle AlexNet, VGG-16, GoogleNet ve ResNet gibi farklı ve güçlü, önceden eğitilmiş derin öğrenme mimarileri birer özellik çıkarıcı olarak kullanarak her bir mimarinin son katmanlarından elde edilen zengin özellik setleri, tek bir büyük havuzda birleştirilmiştir. Bu birleştirilmiş ve yüksek boyutlu özellik setinin, doğrudan bir sınıflandırıcıya verilmesi yerine, bir özellik seçimi sürecinden geçirilmiştir. mRMR algoritması kullanılarak, en bilgilendirici ve birbiriyle en az ilişkili olan özellikler seçilmiş, hem modelin performansı artırılmış hem de gereksiz verinin neden olabileceği karmaşıklık azaltılmıştır. Sınıflandırma aşamasında ise geleneksel CNN yapılarından ayrılarak, son derece hızlı eğitim yeteneğiyle bilinen bir Aşırı Öğrenme Makinesi (Extreme Learning Machine, ELM) kullanılmıştır. Bu optimize edilmiş "derin özellikler" ile beslenen ELM sınıflandırıcısı, %96,03'lük dikkate değer bir doğruluk oranına ulaşmıştır. Bu çalışmada, önceden eğitilmiş derin ağların güçlü özellik çıkarma kapasitelerini, mRMR ve ELM ile birleştirerek hem yüksek doğruluklu hem de hesaplama

açısından verimli, pratik tanı sistemleri oluşturma'nın mümkün olduğunu başarılı bir şekilde gösterilmiştir.

COVID-19 pandemisinin küresel sağlık sistemleri üzerindeki baskısı, Bilgisayarlı Tomografi (BT) görüntülerinin, standart PCR testlerini tamamlayıcı hızlı ve güvenilir bir tanı aracı olarak öne çıkmasını sağlamıştır. Bu alanda derin öğrenmenin potansiyelini ve özellikle transfer öğrenmesi tekniğinin gücünü ortaya koyan çalışmalardan biri (Zhao vd., 2021) tarafından yürütülmüştür. Çalışmanın temel hipotezi, modellerin tıp dışı, çok daha büyük ve çeşitli veri setleri (örneğin ImageNet-21k) üzerinde önceden eğitilmesinin, COVID-19'a özel BT görüntülerinin analizinde performansı önemli ölçüde artıracak yönündedir. Bu hipotezi doğrulamak amacıyla geliştirdikleri "Bit-S" ve "Bit-M" adlı transfer öğrenmesi modellerini, alanın en gelişmiş yöntemlerinden biri olan COVID-Net CT-2 L ile karşılaştırmışlardır. Bit-S ve Bit-M modelleri, rakip modele kıyasla sırasıyla %0,71 ve %1,12'lik bir doğruluk artışı sağlamıştır. Modelin klinik pratikteki güvenilirliğini ölçmek için yapılan daha detaylı analizler ise sonuçların başarılı olduğunu göstermiştir. En iyi performans gösteren Bit-M modeli; %98,7 duyarlılık (sensitivity), %99,5 özgüllük (specificity), %98,5 pozitif öngörü değeri (PPV) ve %99,6 negatif öngörü değeri (NPV) sonuçlarına ulaşmışlardır. Yazarlar bu başarının nedenini, modellerinin daha genel bir görsel dünya bilgisi öğrenerek spesifik tıbbi göreve daha donanımlı başlamasına bağlamışlardır.

2.4. Beyin Tümörü ve Sinir Cerrahisi

Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRG) ile beyin tümörü tespiti, görüntünün çözünürlüğünden doğrudan etkilenen hassas bir süreçtir. Düşük çözünürlüklü görüntüler, tümör sınırlarının net bir şekilde belirlenmesini zorlaştırabilir. Bu zorluğun üstesinden gelmek için görüntü kalitesini artırmayı hedefleyen ön işleme adımlarının önemini vurgulayan (Özyurt vd., 2019), çok aşamalı bir uzman sistem önermişlerdir. Bu çalışmanın temelindeki ilk adım, ham beyin MR görüntülerine Süper Çözünürlük (Super-Resolution - SR) tekniğinin uygulanmasıdır. Görüntü çözünürlüğünü yapay olarak artırma işlemi, sonraki analiz adımları için daha zengin ve detaylı bir veri zemini oluşturur. Çalışmanın asıl yeniliği ise bu yüksek çözünürlüklü görüntüler üzerinde, geleneksel Bulanık C-Ortalamalar (Fuzzy C-Means, FCM) algoritmasının geliştirilmiş bir versiyonu olan Süper Çözünürlüklü Bulanık C-Ortalamalar (Super-Resolution Fuzzy C-Means, SR-FCM) yaklaşımının kullanılmasıdır. Bu yöntem, artırılmış çözünürlüğün sağladığı avantajı kullanarak tümörlü bölgeyi normal dokudan çok daha yüksek bir başarıyla ayırmayı (segmente etmeyi) hedefler. Segmentasyonla elde edilen tümör bölgesinden özellik çıkarmak için, daha az parametreye sahip

olmasıyla bilinen ve hesaplama açısından verimli olan SqueezeNet mimarisini tercih etmişlerdir. Son sınıflandırma aşamasında ise, hızlı eğitim kabiliyetiyle öne çıkan bir ELM kullanılmıştır. Bu hibrit ve çok aşamalı yaklaşım ve SR-FCM ile segmente edilen tümörleri tanımda %98,33'lük bir doğruluk oranına ulaşmışlardır. Bu oran, süper çözünürlük adımı olmadan, standart FCM ile yapılan segmentasyon sonuçlarına kıyasla %10'luk bir performans artışı sağlamıştır.

Beyin tümörlerinin MRG üzerinden hassas bir şekilde segmente edilmesi alanında, özellikle U-Net mimarisi, biyomedikal görüntü segmentasyonunda standart haline gelse de araştırmacılar, U-Net'in temel yapısını daha güçlü özellik çıkarıcılarla birleştirerek performansını daha da ileriye taşımaya çalışmaktadır. Bu yöndeki çalışmaya bir örnek, (Çınar vd., 2022) tarafından sunulan hibrit modelde görülmektedir. Bu çalışmada, araştırmacılar standart bir U-Net mimarisi kullanmak yerine, modelin kodlayıcı (encoder) kısmını, önceden eğitilmiş ve güçlü bir sınıflandırma mimarisi olan DenseNet121 ile değiştirmişlerdir. Bu hibrit yaklaşım, U-Net'in başarılı segmentasyon çerçevesini korurken, DenseNet121'in milyonlarca görüntü üzerinde öğrenmiş olduğu zengin ve karmaşık özellik haritalarından faydalanmasını sağlar. Bu sayede model, tümör dokusunun ince ayrıntılarını ve farklı alt bölgelerini (örneğin, tümörün tamamı, çekirdek tümörü ve kontrast tutan tümör bölgesi) daha yüksek bir hassasiyetle ayırt etme yeteneği kazanmıştır. Önerilen modelin etkinliğini, bu alandaki en zorlu ve standart kabul edilen veri setlerinden biri olan BRATS 2019 üzerinde test etmişlerdir. Bu hibrit DenseNet121-UNet modelinin, özellikle Dice Benzerlik Katsayısı (Dice Similarity Coefficient, DSC) metriği açısından, literatürdeki diğer birçok güncel yöntemden daha üstün sonuçlar verdiğini ortaya koymuşlardır.

Ye vd. (2024), Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRG) verilerini kullanarak beyin tümörü teşhisi (BTD) için CNN ve YSA topolojisini optimize etmeye odaklanan yenilikçi bir yaklaşım sunmuştur. Araştırmanın temel amacı, öğrenme modellerinin yapısını optimize ederek teşhis verimliliğini ve doğruluğunu artırmaktır. Bu doğrultuda, iki aşamalı bir metodoloji geliştirilmiştir. İlk aşamada, beyin MRG'lerinin segmentasyonu için bir CNN modeli kullanılmış ve bu modelin hiper-parametreleri (örneğin filtre boyutları, katman konfigürasyonu) Genetik Algoritma (GA) ile optimize edilmiştir. İkinci aşamada, segmente edilmiş görüntülerden elde edilen özelliklerin boyutu Çoklu Doğrusal Temel Bileşen Analizi (MPCA) ile azaltılmıştır. Son olarak, sınıflandırma işlemi için kullanılan bir YSA'nın gizli katmanındaki nöron sayısı ve ağırlık vektörü yine GA kullanılarak en uygun hale getirilmiştir. Yöntemin etkinliği BRATS2014 ve

BTD20 veri setleri üzerinde test edilmiştir. Önerilen model, bu iki veri setinde sırasıyla %98,6 ve %99,1'lik ortalama sınıflandırma doğruluğuna ulaşarak önceki yöntemlere göre en az %1,1'lik bir iyileşme sağlamıştır. Bu çalışma, Genetik Algoritma'nın hem CNN segmentasyonunu hem de YSA sınıflandırmasını optimize etmedeki gücünü göstererek, BTD alanında daha güvenilir ve verimli otomatik teşhis sistemlerinin geliştirilmesine önemli bir katkı sunmaktadır.

Woźniak vd. (2023), bilgisayarlı tomografi (BT) beyin taramalarının değerlendirilmesinde derin öğrenme yaklaşımlarının etkinliğini artırmak amacıyla yeni bir korelasyon öğrenme mekanizması (CLM) önermiştir. Bu çalışma, CNN ile klasik bir YSA mimarisini birleştiren yenilikçi bir derin sinir ağı yapısı sunmaktadır. Sistemin temel amacı, CNN'in evrişim ve havuzlama katmanları için en uygun filtreleri bulmasına yardımcı olan bir destek sinir ağı kullanarak ana sınıflandırıcının daha hızlı öğrenmesini ve daha yüksek verimliliğe ulaşmasını sağlamaktır. Önerilen CLM modelinde, YSA, CNN'den gelen sonuçları değerlendirir ve bu değerlendirmeye göre bir sonraki iterasyon için CNN'in filtre yapılandırılmalarını optimize eder. Bu hibrit yaklaşım, hem görüntü özelliklerinin çıkarılmasında CNN'in gücünden hem de klasik YSA'nın esnek sınıflandırma yeteneğinden faydalanır. Modelin performansı, iki farklı veri seti üzerinde test edilmiş ve her iki sette de yüksek başarı elde edilmiştir. Sonuçlar, CLM modelinin yaklaşık %96 doğruluk ve %95 kesinlik (precision) ile duyarlılık (recall) değerlerine ulaşabildiğini göstermiştir. Bu çalışma, CNN ve YSA mimarilerinin sinerjik bir şekilde birleştirilmesinin, BT görüntülerinden beyin tümörü tespitinde hem hızı hem de doğruluğu önemli ölçüde artırabileceğini ortaya koyarak, tıbbi görüntü işleme alanında yenilikçi bir çözüm sunmaktadır.

2.5. Yoğun Bakım ve Kardiyak Tahmini

Johnsson vd. (2020), hastane dışı kalp durması (OHCA) sonrası yoğun bakıma kabul edilen hastalarda erken dönemde sonucu tahmin etmek ve risk sınıflandırması yapmak için YSA tabanlı bir model geliştirmeyi amaçlamıştır. Bu denetimli makine öğrenmesi modeli, heterojen klinik çalışmalarda müdahale etkilerini yorumlamaya ve tedaviyi kişiselleştirmeye yardımcı olma potansiyeli taşımaktadır. TTM denemesinin 932 hastadan oluşan kohortu kullanılarak yapılan çalışmada, hastaneye kabul sırasında mevcut olan arka plan, hastane öncesi ve kabul verilerini içeren 54 klinik değişken kullanılmıştır. YSA modeli, 180 günlük fonksiyonel sonucu (iyi veya kötü olarak ikiye ayrılmış Serebral Performans Kategorisi - CPC) tahmin etmede mükemmel bir performans sergileyerek 0.891'lik bir AUC (Eğri Altında Kalan Alan) değerine ulaşmıştır. Bu sonuç, aynı kohort üzerinde geliştirilen geleneksel bir lojistik regresyon

modelinden istatistiksel olarak anlamlı derecede daha iyi bulunmuştur ($p=0.029$). Ayrıca, sadece üç değişken (yaş, ROSC'a kadar geçen süre ve ilk izlenen ritim) kullanılarak oluşturulan basitleştirilmiş bir YSA modelinin bile 0.852'lik bir AUC ile umut verici bir performans gösterdiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma YSA'ların OHCA hastalarında nörolojik iyileşmeyi yüksek bir doğrulukla tahmin edebildiğini ve standart lojistik regresyon modellerini geride bıraktığını göstermiştir. Bu tür modeller, heterojen hasta popülasyonlarını risk sınıflarına ayırmak ve alt gruplardaki tedavi etkilerini belirlemek için kullanılabilir.

Huang vd. (2024), yoğun bakım ünitesindeki (YBÜ) akut kalp yetmezliği (AHF) hastalarında hastane içi mortalite olaylarını tahmin etmenin zorluklarını ele alarak, bu amaçla derin sinir ağı (DNN) tabanlı bir model geliştirmeyi hedeflemiştir. Geleneksel istatistiksel ve makine öğrenmesi yöntemlerinin karmaşık faktörler arasındaki ilişkileri yeterince ele alamadığını belirten araştırmacılar, MIMIC-IV kritik bakım veri tabanını kullanarak modellerini oluşturmuşlardır. Veri setindeki dengesizliği gidermek için sentetik azınlık aşırı örnekleme tekniği (SMOTE) uygulanmıştır. Geri yayımlı sinir ağı (BPNN) ve tekrarlayan sinir ağı (RNN) gibi derin öğrenme modelleri, tekli ve topluluk tabanlı makine öğrenmesi modelleriyle karşılaştırmalı olarak test edilmiştir. Sonuçlar, derin öğrenme modellerinin diğer tüm modellerden üstün performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Özellikle BPNN modeli, %94,9 doğruluk, %92,5 kesinlik, %98,3 duyarlılık ve %98,7'lik bir AUC değeri ile en yüksek performansı sergilemiştir. Ayrıca, modelin yorumlanabilirliği için SHapley Additive explanations (SHAP) analizi yapılmış ve YBÜ skorlarının (APSO, OASIS, SOFA) hastane içi ölüm olaylarının en önemli belirleyicileri olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışma, DNN tabanlı sınıflandırıcıların, YBÜ'deki AHF hastalarının prognozunu değerlendirmek ve mortaliteyi tahmin etmek için etkili ve akıllı bir yaklaşım sunduğunu, böylece klinik karar verme süreçlerine önemli bir katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

2.6. Klinik Destekli İlaç Geliştirme

Simões vd. (2020), ilaç geliştirme sürecinde Tasarımla Kalite (QbD) metodolojisini Yapay Sinir Ağları (YSA) ile birleştirerek, formülasyon geliştirme ile klinik sonuçlar arasında bir köprü kurmayı hedeflemiştir. Çalışma, çözünürlüğü düşük bir ilacın tablet formülasyonunun geliştirilmesine odaklanmıştır. Bu süreçte, ilaç partikül boyut dağılımı (PSD) kritik bir malzeme özelliği olarak tanımlanmış ve YSA modeli kullanılarak bu özelliğin ve diğer proses parametrelerinin in vitro çözünme üzerindeki etkileri modellenmiştir. Tek bir gizli katmanda beş gizli düğüm ve hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonları

kullanılarak oluşturulan YSA modeli hem eğitim hem de doğrulama veri setlerinde tüm yanıtlar için 0.94'ten yüksek R^2 değerleri elde ederek yüksek bir öngörü gücü sergilemiştir. Bu modelden elde edilen tahmin formülleri, tasarım alanını ve proses parametreleri için sıkı limitleri belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Geliştirilen model, endüstriyel ölçekte üretilen serilerin in vitro çözünme profilini yaklaşık %5'lik bir sapma ile başarılı bir şekilde tahmin etmiştir. Sonrasında, üretilen ürün açlık ve tokluk koşullarında yapılan iki ayrı klinik çalışmada referans ürünle biyoequivalan olduğunu kanıtlamıştır. Bu çalışma, YSA'ların, ilaç spesifikasyonlarını ve proses parametrelerini belirlemede, formülasyon geliştirme, in vitro performans ve klinik başarı arasında güçlü bir bağ kurarak QbD ilkelerinin uygulanmasını nasıl destekleyebileceğini başarılı bir şekilde göstermektedir.

Jung vd. (2022), ilaç geliştirme sürecinin yüksek riskli ve maliyetli doğasını ele alarak, bu sürecin planlama aşamasında ilaç firmalarına rehberlik edecek yapay zekâ tabanlı bir karar destek modeli geliştirmeyi amaçlamıştır. İlaç Geliştirme Tavsiye (DDR) olarak adlandırılan bu model, belirli bir şirketin kurumsal yapısı ve yetenekleri göz önünde bulundurularak, başarı olasılığı en yüksek olan ilaç gruplarını tahmin etmeyi ve önermeyi hedeflemektedir. Bu amaçla, üç farklı makine öğrenmesi yaklaşımını birleştiren hibrit bir tavsiye sistemi oluşturulmuştur. Bu sistem; (1) başarılı şekilde pazarlanmış ilaçlar arasındaki ilişkileri ortaya çıkarmak için Birliktelik Kuralı Öğrenimini, (2) benzer şirketlerin başarılı olduğu alanlara dayanarak tavsiyelerde bulunmak için İşbirlikçi Filtrelemeyi (Collaborative Filtering, CF) ve (3) şirket profilleri (finansal durum, Ar-Ge harcamaları vb.) ile ilaç özelliklerine dayalı tahminler yapmak için İçerik Tabanlı Filtrelemeyi (Content-Based Filtering, CBF) kullanmaktadır. İçerik tabanlı filtreleme aşamasında özellikle Random Forest sınıflandırma algoritması uygulanmıştır. Modelin performansı, özellikle içerik tabanlı filtreleme bileşeni için %78 doğruluk ve 0.74 AUC (Eğri Altında Kalan Alan) değeri ile kanıtlanmıştır. Ayrıca, modelin pratik uygulanabilirliği COVID-19 aşı geliştirme başarısını tahmin etme senaryosunda test edilmiş ve DDR modelinden yüksek puan alan şirketlerin klinik deneme aşamalarında daha ileri düzeyde olduğu gösterilmiştir. Bu çalışma, ilaç geliştirme kararlarında sadece teknik faktörlerin değil, aynı zamanda şirkete özgü değişkenlerin de dikkate alınmasının önemini vurgulamaktadır.

Tablo 1. Kitap bölümü kapsamında sunulan literatür çalışmalarının özeti.

Yazar ve Yayın Yılı	Kullanılan Yöntemler	Kategori	En İyi Sonuçlar
Li vd., 2025	CNN+ Informer	Epilepsi ve Nöbet Tahmini	Doğruluk: %99,64
Dong vd., 2024	CNN	Epilepsi ve Nöbet Tahmini	Doğruluk: %97,57
Tamburella vd., 2024	YSA	Kas-İskelet / Spinal Sistem	Doğruluk: %75
Hosseini ve Arjmand, 2024	YSA	Kas-İskelet / Spinal Sistem	Duruş tahmini için $R^2=0.98$; Tahmin edilen duruşa dayalı omurga yükü tahmininde nRMSE $< \%10$ ve $R^2>0.7$
Aghazadeh vd., 2020	YSA	Kas-İskelet / Spinal Sistem	L4-L5 intradiskal basınç tahmininde ölçülen verilerle $R^2=0.89$ uyum
Kutlu vd., 2020	R-CNN	Görüntü İşleme	Doğruluk: %98
Toğaçar vd., 2020	CNN, SVM, LDA	Görüntü İşleme	Doğruluk: %99,41
Özyurt, 2020	CNN, ELM	Görüntü İşleme	Doğruluk: %99,12
Zhao vd., 2021	CNN	Görüntü İşleme	Doğruluk: %99,2
Özyurt vd., 2020	FCM, CNN, ELM	Beyin Tümörü ve Sinir Cerrahisi	Doğruluk: %98,33
Çınar vd., 2022	DenseNet121, UNet	Beyin Tümörü ve Sinir Cerrahisi	Doğruluk: %89
Woźniak vd., 2023	CNN ve YSA tabanlı Korelasyon Öğrenme Mekanizması (CLM)	Beyin Tümörü ve Sinir Cerrahisi	Doğruluk: %96 Kesinlik ve Duyarlılık: %95
Ye vd., 2024	CNN, Genetik Algoritma (GA), MPCA, YSA	Beyin Tümörü ve Sinir Cerrahisi	Doğruluk: %99,1- %98,6
Jung vd., 2022	Birliktelik Kuralı Öğrenimi, CF, CBF (Random Forest ile)	Klinik Destekli İlaç Geliştirme	İçerik Tabanlı Filtreleme bileşeni için Doğruluk: %78 AUC: 0,74
Simões vd., 2020	YSA	Klinik Destekli İlaç Geliştirme	İn vitro çözünme tahmininde $R^2> 0.94$; model ile geliştirilen ürünün klinik olarak

			biyoekevalan bulunması
Johnsson vd., 2020	YSA	Yoğun Bakım ve Kardiyak Tahmin	AUC: 0,891
Huang vd., 2024	Geri Yayılımlı Sinir Ağı (BPNN), RNN, SMOTE	Yoğun Bakım ve Kardiyak Tahmin	BPNN modeli ile Doğruluk: %94,9 AUC: 0,987

3. SONUÇ

Bu kitap bölümünde incelenen çalışmalar, YSA'nın sağlık hizmetlerinin çeşitli alanlarında dönüştürücü bir etkiye sahip olduğunu ve geleneksel analitik yöntemlerin sınırlarını aştığını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Epilepsi nöbetlerinin öngörülmesinden omurilik yaralanmalarının prognozuna, beyin tümörlerinin hassas segmentasyonundan yoğun bakım hastalarının hayatta kalma olasılıklarının tahminine kadar YSA'ların, karmaşık ve çok boyutlu sağlık verilerinden anlamlı örüntüler çıkarma konusundaki üstün kabiliyeti kanıtlanmıştır. CNN, RNN ve Transformer tabanlı hibrit modeller gibi gelişmiş mimariler hem doğruluk hem de verimlilik açısından yeni standartlar belirlemiştir. İncelenen makaleler, YSA'ların yalnızca birer tahmin aracı olmanın ötesinde, klinisyenlere daha derinlemesine içgörüler sunarak kişiselleştirilmiş tedavi planlamalarını ve kaynak yönetimini optimize etme potansiyeli taşıdığını göstermektedir. Bununla birlikte, açıklanabilirlik, veri güvenliği ve etik denetim gibi zorluklar, bu teknolojilerin klinik uygulamalara tam entegrasyonu için aşılması gereken önemli engeller olmaya devam etmektedir. Gelecekteki araştırmalar, bu zorlukları ele alırken YSA modellerinin genelleme yeteneğini ve klinik pratikteki pratik uygulanabilirliğini artırmaya odaklanmalıdır. Sonuç olarak, YSA'lar, sağlık bilişiminin geleceğinde merkezi bir rol oynamaya ve veri odaklı, hassas ve kişiselleştirilmiş bir tıp anlayışının temelini oluşturmaya adaydır.

REFERANSLAR

- Abut, S., Okut, H., & Kallail, K. J. (2024). Paradigm shift from artificial neural networks (ANNs) to deep convolutional neural networks (DCNNs) in the field of medical image processing. *Expert Systems with Applications*, 244, 122983. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122983>
- Aghazadeh, F., Arjmand, N., & Nasrabadi, A. M. (2020). Coupled artificial neural networks to estimate 3D whole-body posture, lumbosacral moments, and spinal loads during load-handling activities. *Journal of Biomechanics*, 102, 109332. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2019.109332>
- Cinar, N., Ozcan, A., & Kaya, M. (2022). A hybrid DenseNet121-UNet model for brain tumor segmentation from MR images. *Biomedical Signal Processing and Control*, 76, 103647. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2022.103647>
- Dong, X., He, L., Li, H., Liu, Z., Shang, W., & Zhou, W. (2024). Deep learning based automatic seizure prediction with EEG time-frequency representation. *Biomedical Signal Processing and Control*, 95, 106447. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2024.106447>
- Hansen, V., Jensen, J., Kusk, M. W., Gerke, O., Tromborg, H. B., & Lysdahlgaard, S. (2024). Deep learning performance compared to healthcare experts in detecting wrist fractures from radiographs: A systematic review and meta-analysis. *European Journal of Radiology*, 174, 111399. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2024.111399>
- Hosseini, N., & Arjmand, N. (2024). An artificial neural network for full-body posture prediction in dynamic lifting activities and effects of its prediction errors on model-estimated spinal loads. *Journal of Biomechanics*, 162, 111896. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2023.111896>
- Huang, J., Cai, Y., Wu, X., Huang, X., Liu, J., & Hu, D. (2024). Prediction of mortality events of patients with acute heart failure in intensive care unit based on deep neural network. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 256, 108403. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2024.108403>
- Johnsson, J., Björnsson, O., Andersson, P., Jakobsson, A., Cronberg, T., Lilja, G., Friberg, H., Hassager, C., Kjaergard, J., Wise, M., Nielsen, N., & Frigyesi, A. (2020). Artificial neural networks improve early outcome prediction and risk classification in out-of-hospital cardiac arrest patients admitted to intensive care. *Critical Care*, 24(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s13054-020-03103-1>
- Jung, Y. L., Yoo, H. S., & Hwang, J. (2022). Artificial intelligence-based decision support model for new drug development planning. *Expert Systems with Applications*, 198, 116825. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116825>

- Kutlu, H., Avci, E., & Özyurt, F. (2020). White blood cells detection and classification based on regional convolutional neural networks. *Medical Hypotheses*, 135, 109472. <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2019.109472>
- Li, C., Li, H., Dong, X., Zhong, X., Cui, H., Ji, D., He, L., Liu, G., & Zhou, W. (2025). CNN-Informer: A hybrid deep learning model for seizure detection on long-term EEG. *Neural Networks*, 181, 106855. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2024.106855>
- Özyurt, F. (2020). A fused CNN model for WBC detection with MRMR feature selection and extreme learning machine. *Soft Computing*, 24(11), 8163–8172. <https://doi.org/10.1007/s00500-019-04383-8>
- Özyurt, F., Sert, E., & Avcı, D. (2020). An expert system for brain tumor detection: Fuzzy C-means with super resolution and convolutional neural network with extreme learning machine. *Medical Hypotheses*, 134, 109433. <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2019.109433>
- Qiu, F., Li, J., Zhang, R., & Legerlotz, K. (2023). Use of artificial neural networks in the prognosis of musculoskeletal diseases—a scoping review. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 24(1), 86. <https://doi.org/10.1186/s12891-023-06195-2>
- Simões, M. F., Silva, G., Pinto, A. C., Fonseca, M., Silva, N. E., Pinto, R. M., & Simões, S. (2020). Artificial neural networks applied to quality-by-design: From formulation development to clinical outcome. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 152, 282–295. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2020.05.012>
- Tamburella, F., Lena, E., Mascanzoni, M., Iosa, M., & Scivoletto, G. (2024). Harnessing artificial neural networks for spinal cord injury prognosis. *Journal of Clinical Medicine*, 13(15), 4503. <https://doi.org/10.3390/jcm13154503>
- Toğaçar, M., Ergen, B., Cömert, Z., & Özyurt, F. (2020). A deep feature learning model for pneumonia detection applying a combination of mRMR feature selection and machine learning models. *IRBM*, 41(4), 212–222. <https://doi.org/10.1016/j.irbm.2019.10.006>
- Woźniak, M., Siłka, J., & Wiczeorek, M. (2023). Deep neural network correlation learning mechanism for CT brain tumor detection. *Neural Computing and Applications*, 35(20), 14611–14626. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-05841-x>
- Ye, J., Zhao, Z., Ghafourian, E., Tajally, A., Alkhazaleh, H. A., & Lee, S. (2024). Optimizing the topology of convolutional neural network (CNN) and artificial neural network (ANN) for brain tumor diagnosis (BTD) through

MRIs. Heliyon, 10(16), e35083.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35083>

Zhao, W., Jiang, W., & Qiu, X. (2021). Deep learning for COVID-19 detection based on CT images. Scientific Reports, 11(1), 93832.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-93832-2>



BÖLÜM 20

Stereo Video Görüntülerini İşlemeye Dayalı Derinlik Analizi

Murat Olcay Özcan¹ & Deniz Taşkın²

1. GİRİŞ

Bilgisayarla görme, makinelerin çevrelerini insan benzeri bir şekilde görmesini ve algılamasını sağlayan bir bilim ve teknoloji alanı olarak tanımlanabilir. Bu amaçla genellikle kameralar kullanılmakta, ancak kameraların üç boyutlu gerçek dünyayı iki boyutlu düzleme indirgemesi, bilgisayarla görme uygulamalarında çeşitli zorluklara yol açmaktadır. İnsanların herhangi bir ek çaba harcamadan üç boyutlu algı oluşturmalarını sağlayan binoküler görme sistemi, bu soruna çözüm arayışında araştırmacılara ilham kaynağı olmuştur. Bu biyolojik sistemden esinlenerek geliştirilen stereo görüş sistemleri, bilgisayarların da benzer şekilde derinlik algısı oluşturabilmesini hedeflemektedir. İnsan beyninin iki gözden gelen görüntüleri birleştirerek üç boyutlu bir sahne algısı üretmesine benzer biçimde, stereo görüşte de aynı sahnenin farklı açılardan elde edilen görüntüleri kullanılarak derinlik bilgisi çıkarılabilmektedir.

Son yıllarda üç boyutlu derinlik analizinin çok çeşitli alanlarda uygulama bulması, stereo görüş konusuna olan ilgiyi artırmış ve bu alanda yoğun araştırmaların yapılmasına zemin hazırlamıştır. Stereo görüş uygulamalarının kullanım alanları olarak 3-boyutlu modelleme, tersine mühendislik, sanal ve artırılmış gerçeklik, robot yöngüdümü ve otonom araçlar için engel tespiti örnek olarak verilebilir (Ambrosch & Kubinger, 2010; Lipnickas & Knyš, 2009; Wang, 2010).

Derinlik analizi yöntemleri pasif ve aktif yöntemler olarak ikiye ayrılmaktadır. Stereo görüşü de içeren pasif yöntemler olarak tanımlanan yöntemlerde, görüntüyü elde etmede ortamdaki ışığı kullanan kamera aygıtları kullanılmaktadır. Aktif yöntemlerde ise, kamera kullanımının yanında, 3-boyutlu görüntülenmek istenen sahne ya da nesne üzerine bir ışık kaynağından bir desen yansıtılarak 3-boyut bilgisi elde edilmektedir. Pasif yöntemler hız, fiyat ve kurulum kolaylığı gibi avantajlarla öne çıkarken, aktif yöntemler daha yüksek başarımler elde etmeleriyle öne çıkmaktadırlar (Dipanda, Woo, Marzani & Bilbault, 2003; Lee & Cho, 2007).

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kırklareli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yazılım Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0001-9159-8973

² Doç. Dr., Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0001-7374-8165

Pasif yöntem kullanan bir stereo görüş sistemi ile derinlik bilgisi elde edebilmek için yerine getirilmesi gereken dört temel adım bulunmaktadır. İlk adım olan stereo kalibrasyon işlemi sonucunda, kameraların görüntü bozukluklarının giderilmesinde kullanılacak iç parametreler ile kameralar arasındaki geometrik ilişkiyi ifade eden dış parametreler elde edilir. İkinci adım olan stereo düzeltme işleminde ise elde edilen parametreler kullanılarak iki kamera görüntüsü düzeltilir ve satır hizalı hale getirilir. Satır hizalı hale getirilmiş görüntüler için, gerçek dünyadaki noktalar iki kameranın resim düzlemlerinde de aynı doğru üzerinde bulunmaktadır ve üçüncü adım olan stereo eşleştirme işlemi için büyük önem arz etmektedir. Stereo eşleştirme işleminde bir kamera görüntüsündeki noktaların diğer kamera görüntüsünde de bulunması hedeflenmektedir. Aynı nokta iki resim düzleminde de bulunduğunda, o noktaya ait aykırılık değeri elde edilebilmekte ve uzaklığı hesaplanabilir olmaktadır. Son adım olan yeniden yansıtma adımı ise eşleşen noktalar için kamera görüntüsü 3-boyutlu hale dönüştürülmektedir.

Derinlik bilgisi elde etme sürecinde stereo eşleştirme adımı en zorlu adım olarak kabul edilmekte olup, eşleştirme zorluklarının sonucu olarak derinlik haritalarında gürültü ve ayırık noktalar ortaya çıkmaktadır.

Geliştirilen stereo görüş sisteminde, stereo eşleştirme için kullanılan blok eşleme algoritmasından en iyi sonucu almak için, eşleştirmede kullanılan parametreler değiştirildiğinde ortaya çıkan sonuçlar gerçek zamanlı olarak aykırılık haritası üzerinde izlenebilmektedir. Bunun sonucunda da en iyi sonucu veren parametreler bulunabilmekte ve kaydedilebilmektedir.

2. STEREO GÖRÜŞ VE DERİNLİK ANALİZİ

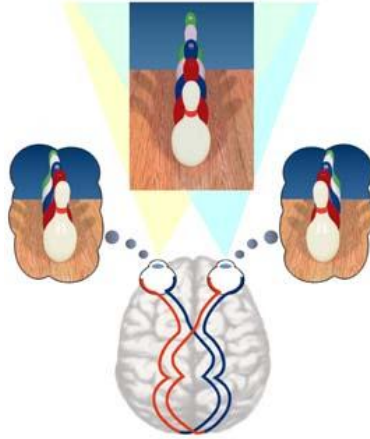
Bilgisayarla görme gerçek dünyadan resimlerin ve verilerin alınması, işlenmesi, analiz edilmesi ve anlamlandırılması için metotlar içeren bir bilgisayar bilimi alanıdır. İnsanların çevrelerini görme ve algılama yeteneğini makinelerle kazandırma hedefiyle ortaya çıkmış olan bu alan, günümüzde hâlen hızlı bir gelişim süreci içerisinde. İnsanlarda görme ve algılama süreçleri doğal ve çabasızsız biçimde gerçekleşirken, bu sürecin bilgisayar sistemlerinde modellenmesi oldukça karmaşık ve hesaplama açısından zorlu bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bilgisayarla görme üzerine yapılan ilk çalışmaların, Lawrence Roberts'ın 1963 yılında yayımladığı "Machine Perception of Three-Dimensional Solids" adlı öncü araştırmasıyla başladığı kabul edilmektedir. Başlangıçta sınırlı uygulama potansiyeline sahip, dar bir araştırma alanı olarak değerlendirilen bilgisayarla görme, zamanla algoritmik, donanımsal ve yapay zekâ temelli ilerlemeler sayesinde günümüzde geniş kapsamlı yöntemlere ve çok çeşitli

uygulama alanlarına sahip güçlü bir bilimsel disiplin hâline gelmiştir. (Ikeuchi, 2014).

2.1 İnsanda Derinlik Algısı

İnsanlar dış dünyayı ekstra bir çaba harcamadan 3-boyutlu olarak görebilmektedirler. Bunu sağlayan en önemli etken, insanların sahip olduğu yan yana ve birbirlerinden yaklaşık 6,5 cm uzaklıkta bulunan iki adet gözdür. Her iki göz de aynı alanın farklı açılardan görüntüsünü elde etmektedir. Şekil 1’de görüldüğü gibi, bu iki görüntü beyinde işlenirken benzerlikler eşleştirilerek ve küçük farklılıklar eklenerek 3-boyutlu tek bir görüntüde birleştirilmekte ve böylece dış dünya 3-boyutlu olarak algılanmış olmaktadır (Dattagupta, 2012).



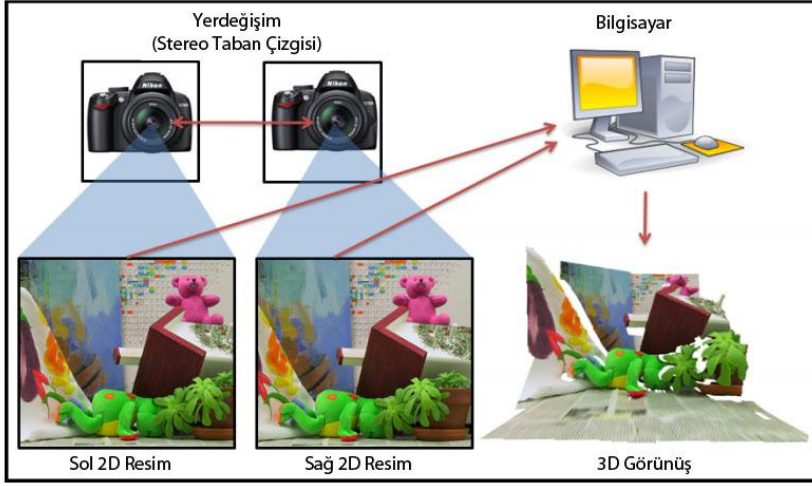
Şekil 1: İnsanda 3-boyutlu görme

2.2 Bilgisayarda Derinlik Analizi

Bilgisayarlar tarafından bir sahnenin derinlik bilgisine ve 3-boyutlu görünüşüne ulaşmak için iki farklı yöntem bulunmaktadır. Bunlardan birincisi insanlarda bulunan görüş sisteminin bilgisayarlar kopyalanmasıyla oluşturulan pasif yöntemler, diğeri ise pasif yöntemin zorluklarını aşabilmek için ortaya çıkarılmış olan aktif yöntemlerdir (May, Pervozelz & Surmann, 2007).

2.2.1 Pasif Görüş Yöntemi

Bu yöntemde, bilgisayarlar tarafından gerçek dünyanın 3-boyutlu algılanması için insanlardaki algılama yönteminden yola çıkılmaktadır. İnsanda bulunan gözlerin yerini bilgisayarda kameralar almaktadır. İki kameradan farklı açılardan alınan iki görüntü bilgisayar tarafından işlenerek, Şekil 2’de görüldüğü gibi 3-boyutlu görüntü elde edilebilmektedir. Bu yöntemde pasif stereo görüş yöntemi adı verilmektedir.



Şekil 2: Pasif stereo görüş

Bilgisayarda iki kamerayla üç boyutlu görme işlemini gerçekleştirmek için, şu dört temel adımın gerçekleştirilmesi gerekir (Bradski & Kaehler, 2008):

- **Stereo kalibrasyon ve lens bozukluklarının giderilmesi:** Kalibrasyon sonucunda elde edilen kamera parametreleri kullanılarak, kamera görüntülerinde lens yapısından kaynaklanan görüntü bozulmalarının giderilmesi gerekmektedir. Bu işlemin sonucunda bozukluğu giderilmiş resimler elde edilmektedir.

- **Stereo Düzeltme:** Kameraların arasındaki açılar ve mesafelerin ayarlanması adımdır. Bu işlemin sonucunda satır-hizalanmış ve düzeltilmiş resimler elde edilir.

- **Stereo Eşleştirme:** Aynı özelliklerin sol ve sağ kameralarda bulunması adımdır. Bu işlemin sonucunda aykırılık haritası elde edilmektedir. Aykırılıklar bulunmuş olan aynı özelliğin, sağ ve sol kameraların resim düzlemlerindeki x-koordinatları arasındaki farktır: $x_l - x_r$

- **Yeniden Yansıtma:** Eğer kameraların geometrik yerleşimi biliniyorsa, üçgenleme yöntemi kullanılarak aykırılık haritası uzaklıklara dönüştürülebilmektedir. Bu işlem yeniden yansıtma olarak adlandırılmakta ve sonucunda derinlik haritası elde edilmektedir.

Bu temel adımların dışında, daha iyi 3-boyutlu algılama için ham görüntüler ve derinlik haritası üzerinde bazı filtreleme ve düzgünleştirme işlemleri de yapılabilmektedir. Derinlik haritasından 3-boyutlu modeller oluşturulmak isteniyorsa modelleme adımı da gerçekleştirilmelidir.

Şekil 3’de stereo eşleştirme çalışmalarında sıklıkla kullanılan Tsukuba resim çifti görülmektedir (Nakamura, Matsuura, Satoh & Ohta, 1996). Tsukuba

Üniversitesi tarafından sağlanan bu resim çifti kalibre edilmiş ve düzeltilmiş görüntülerden oluşmaktadır. Şekil 4’de ise bu görüntülerden elde edilmiş olan aykırılık haritası görülmektedir (Martull, Peris & Fukui, 2012).



Şekil 3: Sol ve sağ kameradan alınan Tsukuba resim çifti



Şekil 4: Tsukuba resim çifti aykırılık haritası

Stereo eşleştirme sonucu elde edilen aykırılık haritasında, kameralara yakın olan nesneler daha açık renklerle, uzaktaki nesneler ise daha koyu renklerle ifade edilmektedir.

2.2.2 Aktif Görüş Yöntemleri

3 boyutlu algılamada pasif yöntemlerin eşleştirme zorluklarını aşmak amacıyla aktif görüş yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerde sahneye ışık gönderen bir yansıtıcı cihaz (lazer veya projeksiyon) bulunur. Yayılan ışık desenleri nesne üzerine düşürülür ve kamerayla algılanarak derinlik bilgisi hesaplanır. Pasif yöntemlere göre daha doğru ve güvenilir sonuçlar verirler. Ancak ışık kullanımı nedeniyle genellikle iç mekânlarda tercih edilirler ve sistem bileşenlerinin önceden kalibrasyonu gerekir. Lazer tabanlı sistemlerde göze zarar riski bulunabildiğinden güvenli dalga boyları (ör. kızılötesi) tercih edilir.

Aktif yöntemler, derinlik hesaplamasında Üçgenleme ve Uçuş Zamanı olarak iki temel prensibe dayanır:

• Üçgenleme Yöntemi Kullananlar

Bu yöntemde ışık kaynağı, kamera ve nesne bir üçgen oluşturur; derinlik, trigonometrik hesaplarla belirlenir. Başlıca alt türleri şunlardır:

- Tekli/Çoklu Nokta Kullanımı: Lazerle sahneye birçok nokta gönderilir, kamera bu noktaları algılayarak derinlik çıkarır. Microsoft Kinect 1.0 bu yöntemi kullanır; kızılötesi ışıkla çalıştığı için insan sağlığına uygundur.
- Çizgi Kullanımı: Lazer ışığı tek bir çizgi hâlinde yansıtılarak nesne taranır. Çok hassas sonuçlar verir fakat yavaştır ve lazer güvenlik riski taşır.
- Saçak ve Kodlanmış Desen Kullanımı: Projeksiyon cihazıyla nesneye faz desenleri yansıtılır, kamera bu desenlerin bozulmasını analiz ederek derinliği hesaplar. Kalibrasyon gerektirir ve genellikle iç mekâna uygundur.
- Moire Efekt: Nesne üzerine ızgara desenleri yansıtılır, oluşan gölgelerden derinlik bilgisi çıkarılır. Basit kurulumuyla düşük maliyetli sistemlerde kullanılır.

• Uçuş Zamanı (Time of Flight) Yöntemi Kullananlar

Bu yöntemde, lazer ışınının nesneye gidip geri dönme süresi ölçülür. Işığın hızı (c) ve geçen süre (t) bilindiğinde uzaklık $d = c \cdot t / 2$ formülüyle hesaplanır.

- Lazer Uzaklık Bulucular: Lazer ışını gönderilip yansıma süresi ölçülür. Geniş alanların 3B taramasında (örneğin bina veya arazi modellerinde) kullanılır.
- İnterferometri: Işık demetlerinin faz farkı ölçülerek mikron düzeyinde hassas derinlik bilgisi elde edilir. Yüksek çözünürlüklü ölçümler sayesinde yüzey kalite kontrolü ve koordinat ölçüm cihazı kalibrasyonu gibi alanlarda kullanılır.

Sonuç olarak, aktif yöntemler sahne dokusuna bağımlı olmadan yüksek doğrulukta derinlik verisi sağlar; uygulama türüne göre hız, doğruluk ve güvenlik arasında denge kurularak seçilir.

3. STEREO GÖRÜŞ KULLANARAK DERİNLİK ANALİZİ

İnsanların dış dünyayı 3-boyutlu görmesinden yola çıkarak geliştirilen stereo görüş ile derinlik analizi yapılırken, gerçekleştirilmesi gereken dört temel adım daha önce kısaca açıklanmıştı. Bu dört temel adımın öncesinde, görüntünün elde edilmesini de bir işlem adımı olarak kabul edebiliriz. Derinlik analizi sonrası sahnenin gerçek görüntüsü kullanılarak 3-boyutlu modelleme yapabilmek amacıyla kalibrasyon, düzeltme, eşleştirme adımlarından sonra yeniden yansıtma adımına modelleme özelliği de eklenmiştir.

Geliştirilen stereo görüş sistemi ile derinlik analizindeki temel adımlar Şekil 5’de görülmektedir.



Şekil 5: Stereo görüş ile 3-boyutlu modelleme adımları

3.1 Görüntünün Elde Edilmesi

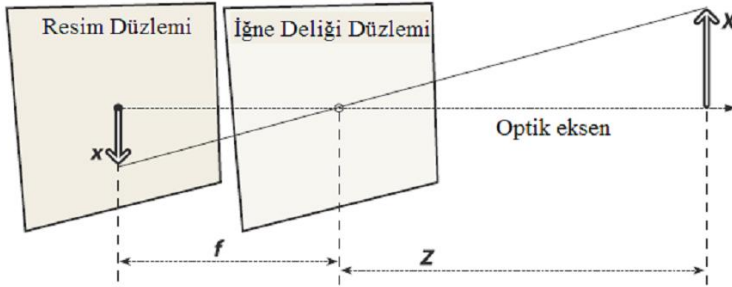
İnsan gözü ya da kamera kullanıldığında, görme işlevi dünyadan gelen ışığın algılanmasıyla başlamaktadır. Güneş ya da başka bir ışık kaynağından yayılan ışık bir nesneye çarpana kadar uzayda hareket etmektedir. Işık nesneye çarptığında büyük bir kısmı emilmekte, geri kalan ışık ise gözdeki retinada ya da kameradaki resim düzleminde toplanmaktadır. Bu oluşan geometrinin bilgisayarlı görüşte çok önemli bir yeri vardır ve iğne deliği kamera modeli olarak adlandırılmaktadır (Bradski & Kaehler, 2008).

3.1.1 İğne Deliği Kamera Modeli

Görüntü elde etme modeli fotoğrafçılığın başlangıcından beri temel olarak hiç değişmemiştir. Bir nesneden gelen ışık kameranın önünde bulunan bir açıklık ya da delik tarafından yakalandıktan sonra bu ışık huzmeleri kameranın arka

tarafında bulunan bir resim düzlemine çarpmaktadır (Laganière, 2011). Kamera modeli, ışığın geldiği noktanın 3-boyutlu koordinatları ile resim düzlemine yansımış halinin 2-boyutlu koordinatları arasındaki matematiksel ilişkiyi ifade eder (Aydın, 2011; Ikeuchi, 2014).

İğne deliği kamera yapısı Şekil 6’da görülmektedir. Bu modelde resim düzlemi ile iğne deliği düzlemi arasındaki uzaklığa odak uzaklığı denmekte ve f ile gösterilmektedir. Nesnenin iğne deliğine uzaklığı Z , nesnenin uzunluğu X , resim düzlemi üzerinde nesnenin görüntüsü ise x ile ifade edilir.



Şekil 6: İğne deliği kamera modeli

3.1.2 Lens Bozuklukları

Teoride görüntüde hiçbir bozukluk oluşturmeyen bir lens tanımlamak mümkün gibi gözükse de, gerçekte mükemmel lens yoktur. Bu daha çok üretim kaynaklı bir durumdur. Küresel bir lens üretmek, matematiksel olarak daha uygun olan parabolik lens üretmeye göre çok daha kolaydır. Lensin şeklinden kaynaklanan radyal bozukluk ve kameranın birleştirilme işleminden kaynaklanan teğetsel bozukluk en çok görülen iki ana bozukluk çeşididir.

Radyal bozukluk kamerada kullanılan lensin küresel biçimde olmasından kaynaklanan bozukluktur. Kameranın kalitesi ve sahip olduğu odak uzaklığı düştükçe görüntüdeki bozukluk da daha kolay bir şekilde fark edilebilmektedir (Hartley & Zisserman, 2003).

Teğetsel bozukluk ise resim düzlemi ile lensin tam olarak paralel olmadığı zaman oluşan bir bozukluktur. Bu paralellik üretim aşamasında gerçekleştirileceği gibi, kötü kullanım ya da düşme gibi sebeplerle kamerada daha sonra da ortaya çıkabilmektedir.

3.2 Kalibrasyon

Stereo görüş kullanarak resimlerden metrik ölçüm yapılmasında, hareket ya da derinlik bilgisi elde edilmesinde kalibrasyon işlemi çok önemli bir adımdır

(Beşdok, 2009). Kalibrasyonun doğruluğu bilgisayarla görme sisteminin performansına direkt etki etmektedir (Memon & Sohaib, 2001).

Kalibrasyon işlemi, kameranın optik özelliklerini belirten iç (intrinsic) parametreleri ile geometrik özelliklerini belirten dış (extrinsic) parametrelerinin bulunması işlemi olarak tanımlanmaktadır (Tsai, 1987).

İç parametreler radyal bozukluktan kaynaklanan, gerçek dünya koordinatlarındaki bir birimin kamera koordinatlarında bir birime denk gelmediği durumda gerekli eşitlemenin sağlanması için kullanılan parametrelerdir. K matrisi ile gösterilir ve toplam beş adet parametreden oluşmaktadır. Bu beş parametre şunlardır:

- odak uzaklığı f
- x ve y eksenleri üzerindeki piksel uzunluğunu gösteren s_x ve s_y
- temel nokta o_x ve o_y

Dış parametreler ise teğetsel bozukluktan kaynaklanan, kamera düzleminin merkezde olmadığı durumda bozukluğun giderilmesi için kullanılan parametrelerdir. R döndürme matrisi ve t öteleme vektörünün oluşturduğu dış parametreler $[R|t]$ şeklinde gösterilmektedir.

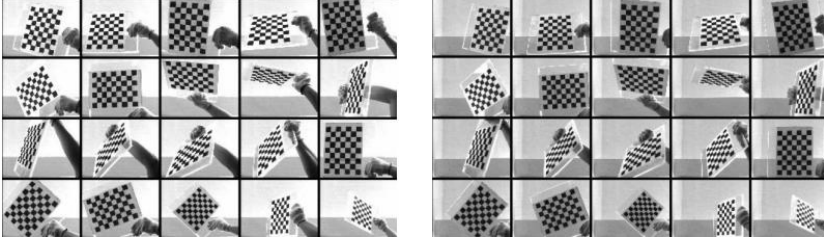
3.2.1 Stereo Kalibrasyon

Stereo görüşte bir yerine en az iki kamera kullanıldığından iki kameranın kalibrasyon işlemi birlikte yapılmalıdır. Stereo görüşteki en önemli noktalardan biri sol kameranın sağ kameraya göre ilişkisinin bilinmesi gerekliliğidir. Bu yüzden stereo kalibrasyonda iki kameranın geometrik ilişkisini belirten sisteme ait dış parametreler de bulunmaktadır. Bir stereo sistemi konumlandırma ve iç özellikleri çıkarıldıktan sonra kalibre edilmiş stereo sistem olarak tanımlanabilir. Stereo sistemin çalışması sırasında bu kalibre edilmiş durumdan bir sapma meydana gelirse hatalı sonuçlar elde edilir (Savarese, 2014).

Stereo kalibrasyon aynı sahne için özellikleri bilinen kalibrasyon nesnelerinin iki kamera ile görüntülerinin alınması ve elde edilen görüntülerin işlenmesi ile gerçekleştirilir. En pratik ve çok kullanılan yöntem olan satranç tahtası deseninde, tahtanın köşe uzaklıkları bilindiğinden ve sabit olduğundan bu değerler üzerindeki bozulmalar incelenerek iç parametreler elde edilebilmektedir. Dış parametrelerin elde edilmesi için ise iki kameradan aynı sahnede elde edilen görüntülerin incelenmesi gerekir. Aynı sahneden elde edilmiş görüntüler üzerinden sol kameranın sağ kameraya göre geometrik modeli ortaya çıkartılmaktadır (Ikeuchi, 2014).

Stereo kalibrasyon işlemini gerçekleştirmek için satranç tahtasının farklı açılardan görüntüsü iki kamera tarafından da alınmalıdır. Şekil 7’de bir stereo

görüş sisteminde sağ ve sol kamera için alınan görüntüler görülmektedir. Kalibrasyonun başarısı için en az on farklı satranç tahtası görüntüsünün kullanılması tavsiye edilmektedir (Boykov, Veksler & Zabih, 2001).



Şekil 7: Sırasıyla sol ve sağ kameradan alınan görüntüler

3.3 Stereo Düzeltme

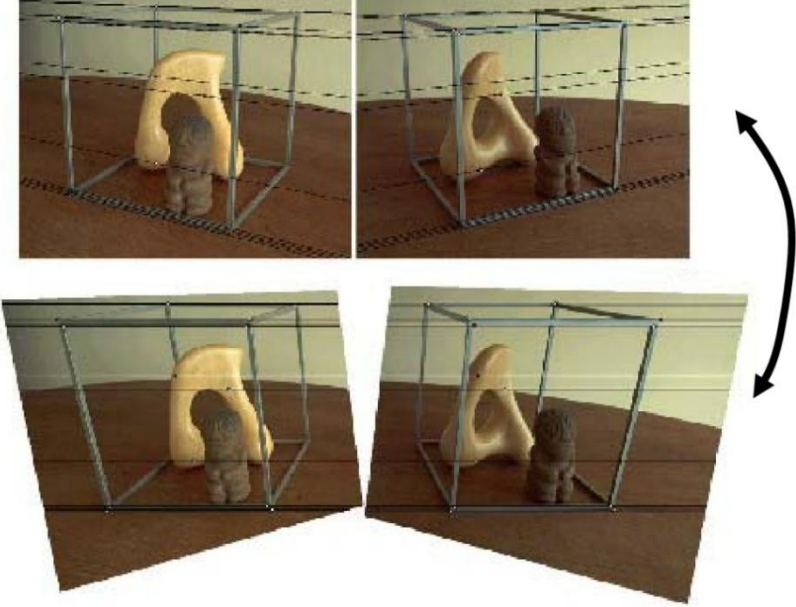
Stereo düzeltme resim çiftlerindeki eşleşen noktaların resimler üzerinde aynı satırda bulunmasını sağlayan iki resmin dönüştürme işlemi olarak tanımlanmaktadır (Short, 2009). Bu işlemin sonucunda kamera görüntüleri satır hizalanmış hale gelmektedirler. Düzeltme adımı resimler üzerinde yapılan işlemler sırasıyla Şekil 8’de görülmektedir. Düzeltme işleminden sonra genellikle resimlerin kenarlarında fazlalık olarak bazı kısımlar bulunabilmektedir. Bunlar görünüm ya da daha performanslı çalışma adına istenirse kırpılarak resimlerden atılabilir.



Şekil 8: Stereo düzeltme adımları

Stereo görüŖte derinlik bilgisine ulaşabilmek için bir resimdeki noktanın diğ̇er resimdeki karşılığının bulunması gerekmektedir. Düzeltilmiş ve satır hizalanmış görüntülerde eşleştirme işlemi 2-boyutlu bir aramadan 1-boyutlu bir arama haline dönüşmektedir. Bu durum da eşleştirme işleminin hız ve başarımını arttırmaktadır.

Epipolar düzeltme sonrası Şekil 9’da görüldüğü üzere satır hizalanmış resimler elde edilmektedir. Sol resimdeki noktalar sağ resimde aynı epipolar doğru üzerinde aranarak eşleştirme işlemi daha hızlı bir hale getirilmiş olmaktadır.



Şekil 9: Düzeltme uygulanmamış(üst) ve uygulanmış(alt) kamera görüntüleri

3.4 Stereo Eşleştirme

Bir sahnenin 3 boyutlu yapısını elde edebilmek için farklı bakış açılarından çekilmiş stereo görüntülerinde görülen her noktanın uzaydaki koordinatlarının elde edilmesi gerekir. Stereo eşleme problemi aslında bir arama problemi olarak düşünülebilir.

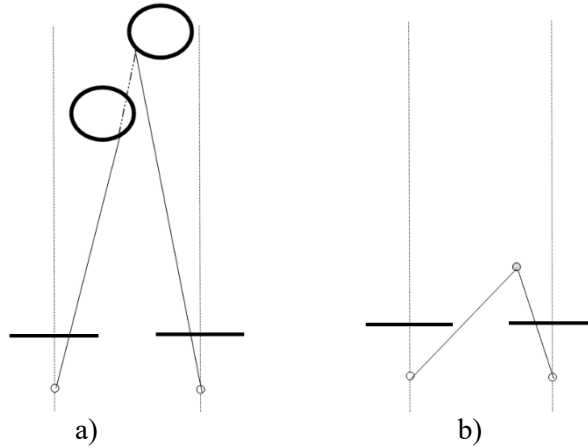
Stereo eşleştirme algoritmalarının büyük bölümünün amacı genel olarak sol görüntüyü referans görüntü olarak belirleyerek, her bir piksel için bir aykırılık kestirimi yapmaktır. Bu aykırılıklar sağ ve sol kameralarda görülen özelliklerin resim düzlemindeki koordinatları arasındaki farktır. Aykırılık kestirimleri gözlemlenen nesnelerin ters çevrilmiş uzaklıkları olarak yorumlanmaktadır.

3.4.1 Eşleştirme Adımının Zorlukları

Bu adımları kullanarak stereo görüşün oluşturulmasında en büyük zorluk eşleştirme adımında ortaya çıkmaktadır. Eşleştirme adımı aslında bir arama problemidir. Sol resimdeki bir eleman için, bu elemana sağ resimde karşılık gelen eleman bulunmalıdır (Treiber, 2013).

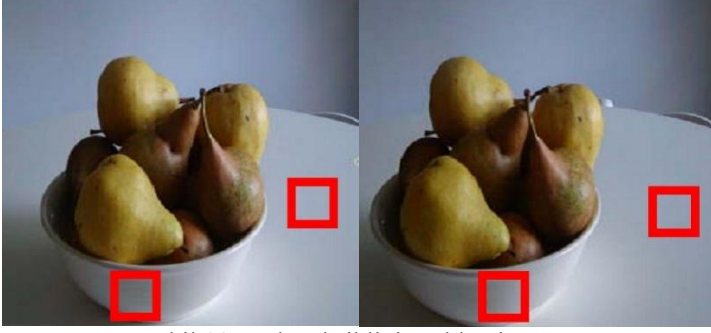
Sol resimdeki bir noktanın karşılığının sağ resimde bulunması zaten zor bir işlemken, bu durumu daha da zorlaştıran etmenler vardır. Bunlar:

- **Tıkama:** Görüntüdeki bir nesnenin başka bir nesnenin önünü tıkayarak kameralardan bir tanesi için görüntülenememesi durumudur. Şekil 10a'da görüldüğü üzere soldaki kamerada belirtilen noktanın görüntüsüne ulaşılamamaktadır.
- **Sınırlı görüş açısı:** Özellikle kameraya yaklaştıkça bir kameranın görüş açısındaki bazı noktalar diğer kameranın görüş açısında bulunmayabilir. Şekil 10b'de görüldüğü üzere belirtilen nokta soldaki kameranın görüş açısına girmemektedir (Hager, 2003).



Şekil 10: Eşleştirme zorlukları a) görüntüde tıkanma b) sınırlı görüş açısı

- **Doku Eksikliği:** Resimler üzerinde fazla doku bulunmayan homojen bölgelerde bir noktanın karşılığını bulmak zorlaşmaktadır. Şekil 11'de iki resim üzerinde eşleştirmesi zor olan homojen bölgeler görülebilir (Savarese, 2014).



Şekil 11: Doku eksikliği problemi

- **Tekrarlayan desenler:** Aynı deseninin resim içinde belli bir alanda tekrarlandığı durumlarda eşleştirme işlemi yapmak zordur. Şekil 12’de görüldüğü üzere işaretli alanda aynı desen tekrarlanmaktadır.



Şekil 12: Tekrarlayan desenler problemi

- **Kameralar arası uzaklık:** Kameralar arası uzaklığın az ya da çok olmasına göre eşleştirmenin zorluğu ve başarımı etkilenmektedir. Uzaklık az ya da çok olduğu durumların karşılaşması Tablo 1’de görülmektedir (Szeliski, 2010).

Tablo 1: Kameralar arası uzaklık etkisi

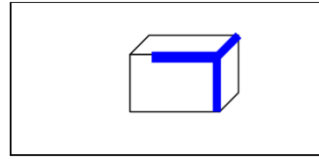
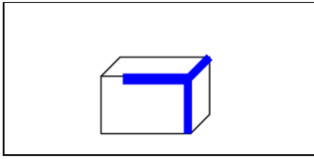
Kameralar arası uzaklık az	Kameralar arası uzaklık çok
Küçük aykırılık değerleri (Daha kötü derinlik haritası)	Büyük aykırılık değerleri (Daha iyi derinlik haritası)
Gürültüye karşı yüksek hassaslık	Gürültüye karşı düşük hassaslık
Daha kolay eşleştirme (daha fazla eşleşen noktalar)	Daha zor eşleştirme (tıkama artışı ve daha az eşleşen noktalar)

3.4.2 Eşleştirme Algoritmaları

Stereo algoritmaları sol ve sağ resimler üzerindeki noktaları, iki resim arasında benzerlikler bularak eşleştirmeyi hedefleyen algoritmalarlardır. Bu algoritmalar verdikleri sonuçlara göre, seyrek sonuç veren ve yoğun sonuç veren yöntemler olarak ikiye ayrılmaktadır. Özellik bazlı eşleştirme yapan algoritmalar seyrek sonuç vermekte, nokta ya da alan eşleştirmesi yapan algoritmalar ise yoğun sonuç vermektedirler. Yoğun sonuç veren yöntemler de, en iyi eşleşen noktanın karar verilmesinde kullandıkları yöntemlere göre yerel ya da global yöntemler olarak ikiye ayrılmaktadırlar.

3.4.2.1 Özellik Bazlı Eşleştirme

Özellik bazlı eşleştirme algoritmaları iki resim üzerinde özellik çıkarımı yaparak bunları eşleştirmeyi hedefleyen algoritmalarlardır. Köşeler, kenarlar, açılar ve kavisler gibi özellikler anahtar noktalar olarak tanımlanmakta ve eşleştirilmektedir (Hu, 2011). Şekil 13’de özellik eşleştirme yönteminin temel hali görülmektedir.



Şekil

13: Özellik eşleştirme yöntemi

Yöntemin başarısı özellik çıkarmadaki başarısına bağlıdır. Özellikler eksik ya da hatalı belirlenmişse, eşleme sonucunda da hatalı sonuçlar ortaya çıkmaktadır (Candemir, 2011). Yöntemin bir diğer dezavantajı da, eşleştirmeden başka özellik çıkarımı aşamasının da bulunması sebebiyle işlemsel maliyetleri arttırıyor olmasıdır (Møller, 2006).

Şekil 14’de bir döner masa üzerinde bulunan içecek kutusunun özellik çıkarma yöntemiyle 3-boyutlu modelinin çıkarılması aşamaları ve sonuçları görülmektedir (Szeliski & Weiss, 1998).



a)



b)



c)



d)

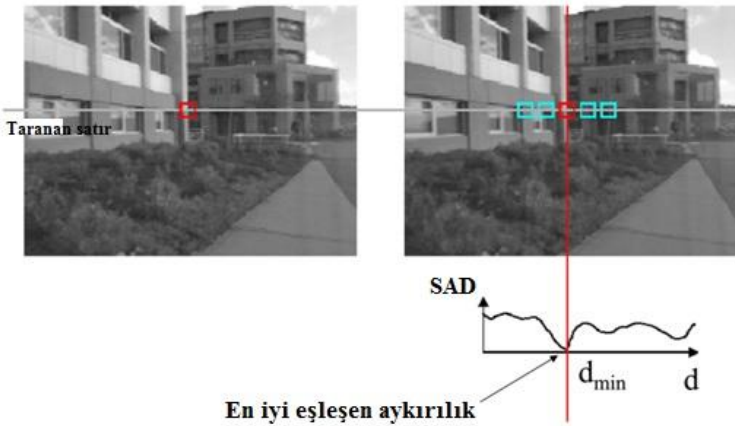
Şekil 14: İçecek kutusu özellik bazlı eşleştirme a) kamera görüntüsü b) kenar çıkarımı c) epipolar kavisler d) 3-boyutlu modellenmiş noktalar

3.4.2.2 Yerel Yöntemler

İlk geliştirilen algoritmalar referans resimdeki pikselin ikinci resimdeki karşılığını piksel bazında arama yöntemini tercih etmişlerdir. Hangi pikselin aranan pikselin karşılığı olduğu konusunda karar vermede yöntemine göre tanımlanan maliyet fonksiyonundan yararlanmışlardır. Bu algoritmalara göre, karşılaştırılan iki pikselin benzerliği arttıkça maliyet fonksiyonu sonucu ulaşılan değer düşmektedir (Lazaros, Sirakoulis & Gasteratos, 2008).

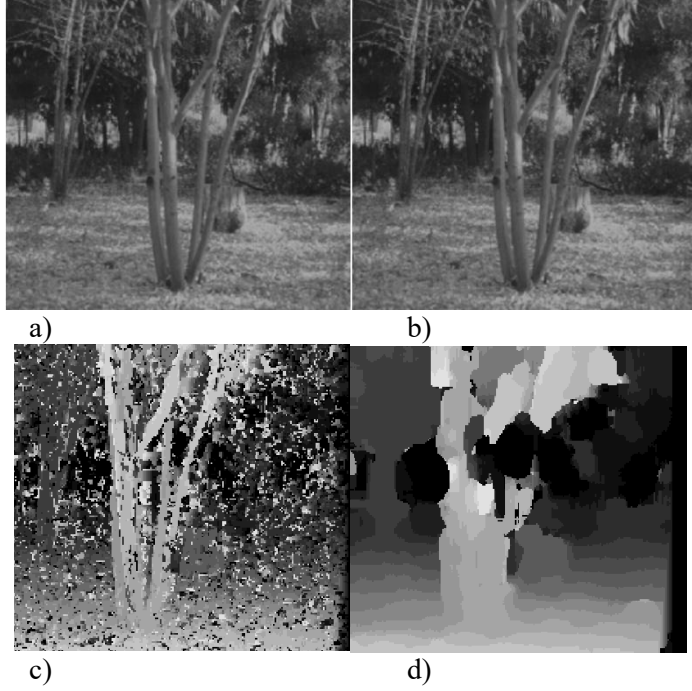
Daha sonraları piksel eşleştirme algoritmalarının performansını arttırmak için aranan pikselin komşu pikselleri de arama işlemine dahil edilmeye başlanmıştır. Blok eşleştirme algoritmaları olarak ifade edilen bu algoritmalar maliyet fonksiyonu değerini verirken hesaplama yapılan pikselin komşu piksellerini de hesaba katmaktadırlar.

Şekil 15’de görüldüğü üzere sol resimde kırmızı kare ile gösterilen alan için ikinci resimde aynı satır çizgisi üzerinde, aynı büyüklükteki bloklar için maliyet fonksiyonu hesaplanmaktadır. Maliyet fonksiyonu için en düşük değeri veren blok aykırılığın hesaplanması için seçilmektedir.



Şekil 15: Blok eşleme algoritması ve en düşük maliyet fonksiyonu

Blok eşleme algoritmalarının gürültü duyarlılığı piksel eşleştirme algoritmalarına göre daha az olmakla birlikte, daha az ayrıntılı sonuçlar elde etmektedirler. Bir piksel için ne kadar sayıda komşunun hesaba katılacağı pencere boyutu ile karar verilir ve pencere boyutuna göre gürültü ve ayrıntı düzeyi arasında seçim yapmak gerekir. Şekil 16’da seçilen pencere boyutunun aykırılık haritası üzerindeki etkisi görülebilir.



Şekil 16: Pencere boyutunun aykırılık haritası üzerindeki etkisi a) sol resim b) sağ resim c) pencere boyutu W=3 d) pencere boyutu W=20

3.4.2.3 Global Yöntemler

Yerel yöntemlerle karşılaştırıldığında, global yöntemler referans resimdeki tüm pikseller için aykırılık değerlerini bir seferde belirlemeyi hedeflerler. Bazı optimizasyon teknikleri kullanarak bir enerji fonksiyonunun minimize edilmesi ile aykırılık belirlemesi yapılır. Enerji fonksiyonu genellikle bir eşleşme veri terimi, bir de düzgünlük terimi içermektedir (Lazaros, Sirakoulis & Gasteratos, 2008; Scharstein & Szeliski, 2002):

$$E(d) = E_{data}(d) + \lambda \cdot E_{smooth}(d) \quad (1)$$

Veri terimi aykırılık fonksiyonu d'nin resim çiftiyle uyumunu ölçerken, λ ise sonucun düzgünlüğünü değiştiren parametredir. C aykırılık uzay resmindeki eşleşme maliyeti olacak şekilde, veri terimi şu şekilde ifade edilir:

$$E_{data}(d) = \sum_{(x,y)} C(x, y, d(x, y)) \quad (2)$$

Düzgünlük terimi ise algoritma tarafından yapılan düzgünlük varsayımlarını kodlar. Optimizasyon hesabını izlenebilir yapmak için, düzgünlük terimi genellikle komşu piksellerin aykırılık farklarını ölçmekle sınırlandırılır. p aykırılık farkının bir tekdüze artış fonksiyonu olmak üzere, düzgünlük terimi şu şekilde ifade edilir:

$$E_{smooth}(d) = \sum_{(x,y)} p(d(x,y) - d(x+1,y)) + p(d(x,y) - d(x,y+1)) \quad (3)$$

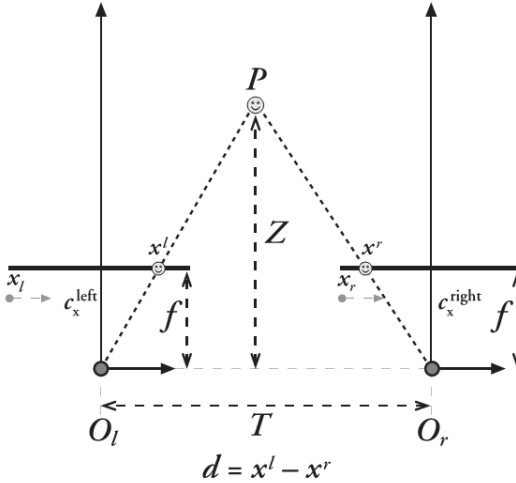
Global enerji tanımlandıktan sonra çeşitli algoritmalar kullanılarak minimum değeri elde edilebilir. Regülerizasyon ve Markov Rastgele Alanları gibi geleneksel yöntemleri kullanan algoritmalar yanında, maksimum-akış ve çizge-kesme yöntemini kullanan algoritmalar da ortaya çıkmıştır.

3.5 Yeniden Yansıtma

Aykırlık haritası sahnedeki nesnelerin kameraya olan uzaklıkları hakkında göreceli olarak bilgi vermektedir. Birçok çalışmada aykırılık haritası sonuçları derinlik sonucu olarak kullanılabilir. Ancak 3-boyutlu modelleme, robot tutuşu ve navigasyonu gibi amaçlar için derinlik bilgisi gerektiğinde aykırılık haritasından derinlik haritasının oluşturulması gereklidir. Derinlik haritası oluşturmada üçgenleme yöntemi kullanılmaktadır.

3.5.1 Üçgenleme

Kalibrasyon ve düzeltme adımları sonrasında, Şekil 17’de görülebilecek stereo sisteminin görüntü bozuklukları giderilmiş, hizalanmış ve ölçülmüş bir stereo sistemi olduğu varsayılmaktadır (Bradski & Kaehler, 2008). Bu işlemlerin sonucunda, kameraların resim düzlemleri düzlemde, aralarındaki uzaklık bilinen optik eksenleri paralel ve odak uzaklıkları $f_l = f_r$ olmaktadır. Aynı zamanda kameraların merkez noktaları c_x^{sol} ve $c_x^{sağ}$ sağ ve sol resimlerde aynı koordinatlara karşılık gelecek şekilde kalibre edilmiş durumdadır.



Şekil 17: İdeal stereo sisteminde derinlik (Z)

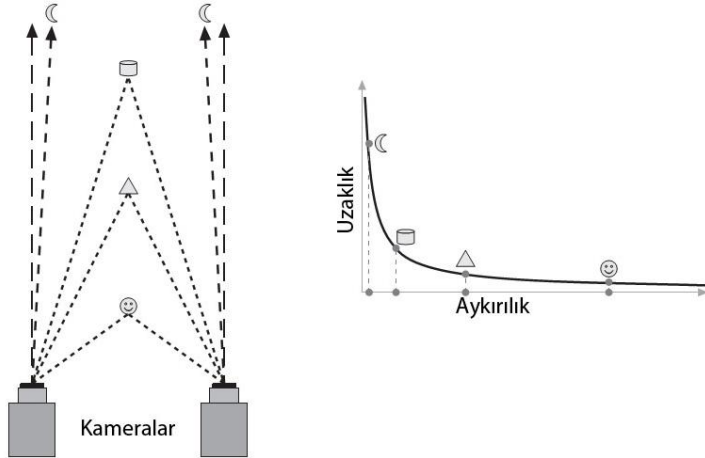
P gerçek dünyada bir nokta olmak üzere, bu noktanın sol ve sağ resimdeki karşılığı sırasıyla p^l ve p^r ve yatay koordinatlarının da x^l ve x^r olduğu varsayılmaktadır.

x^l ve x^r 'nin noktanın iki resim düzlemindeki yatay pozisyonları olduğu bilindiğinde aykırılık basit şekilde $d = x^l - x^r$ olarak tanımlanabilir, bu durumda derinliğin ise aykırılık ile ters orantılı olduğu görülmektedir. Şekil 4.31'de gösterilen bu duruma göre, üçgenlerde benzerlik kuralından yola çıkarak Z derinlik değeri görüldüğü gibi hesaplanabilmektedir:

$$\frac{T - (x^l - x^r)}{Z - f} = \frac{T}{Z} \quad (4)$$

$$Z = \frac{f T}{x^l - x^r} \quad (5)$$

Aykırılık ile derinlik arasında ters orantı olduğundan aralarında doğrusal olmayan bir ilişki vardır. Aykırılık sıfıra yaklaştıkça, küçük aykırılık farkları büyük derinlik farklarına sebep olur. Aykırılık yüksek olduğunda ise, küçük aykırılık farkları derinlik üzerinde kayda değer bir değişim yaratmazlar. Bunun sonucu olarak, stereo görüş sistemleri sadece kamera yakınındaki nesneler için yüksek derinlik çözünürlüğü sağlayabilir. Bu durum Şekil 18'de görülmektedir (Bradski & Kaehler, 2008).



Şekil 18: Aykırılık ve derinlik ilişkisi

3.5.2 Derinlik Haritası Oluşturma

Stereo düzeltme sonrasında, homojen koordinatlardaki 3-boyutlu bir noktanın homojen koordinatlardaki 2-boyutlu bir nokta olarak ifade edilmesini sağlayan yeniden yansıtma matrisi şu şekilde ifade edilebilir:

$$P \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix} \quad (6)$$

ve ekran koordinatları $(x/w, y/w)$ şeklinde hesaplanabilir. Ekran koordinatları ve kamera iç parametreleri verilen bir 2-boyutlu nokta da aynı şekilde 3-boyuta dönüştürebilir. Bu dönüşümü yapan yeniden yansıtma matrisi şu şekilde ifade edilir:

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -c_x \\ 0 & 1 & 0 & -c_y \\ 0 & 0 & 0 & f \\ 0 & 0 & -1/T_x & (c_x - c'_x)/T_x \end{bmatrix} \quad (7)$$

Q yeniden yansıtma matrisinde sağ resimdeki esas noktanın x koordinatını gösteren c'_x hariç tüm parametreler sol resme aittir. Eğer esas doğrular sonsuzlukta çakışıyorsa $c_x = c'_x$ olduğundan matrisin sağ alt köşesindeki değer 0 olacaktır. Aykırılık değeri d olarak belirlenmiş bir 2-boyutlu homojen nokta verildiğinde, noktayı 3-boyuta şu denklemi kullanarak çevirebiliriz:

$$Q \begin{bmatrix} x \\ y \\ d \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ W \end{bmatrix} \quad (8)$$

Denkleme göre, aykırılığı d olan bir (x,y) noktasının 3-boyutlu koordinatları $(X/W, Y/W, Z/W)$ olarak hesaplanır.

3.6 3-Boyutlu Modelleme

Nokta bulutu bir koordinat sistemindeki veri noktalarının kümesini ifade eder. Üç-boyutlu koordinat sisteminde bu noktalar genel olarak X , Y ve Z koordinatlarıyla tanımlanır ve bir nesnenin dış yüzeyinin görüntülenmesinde kullanılır.

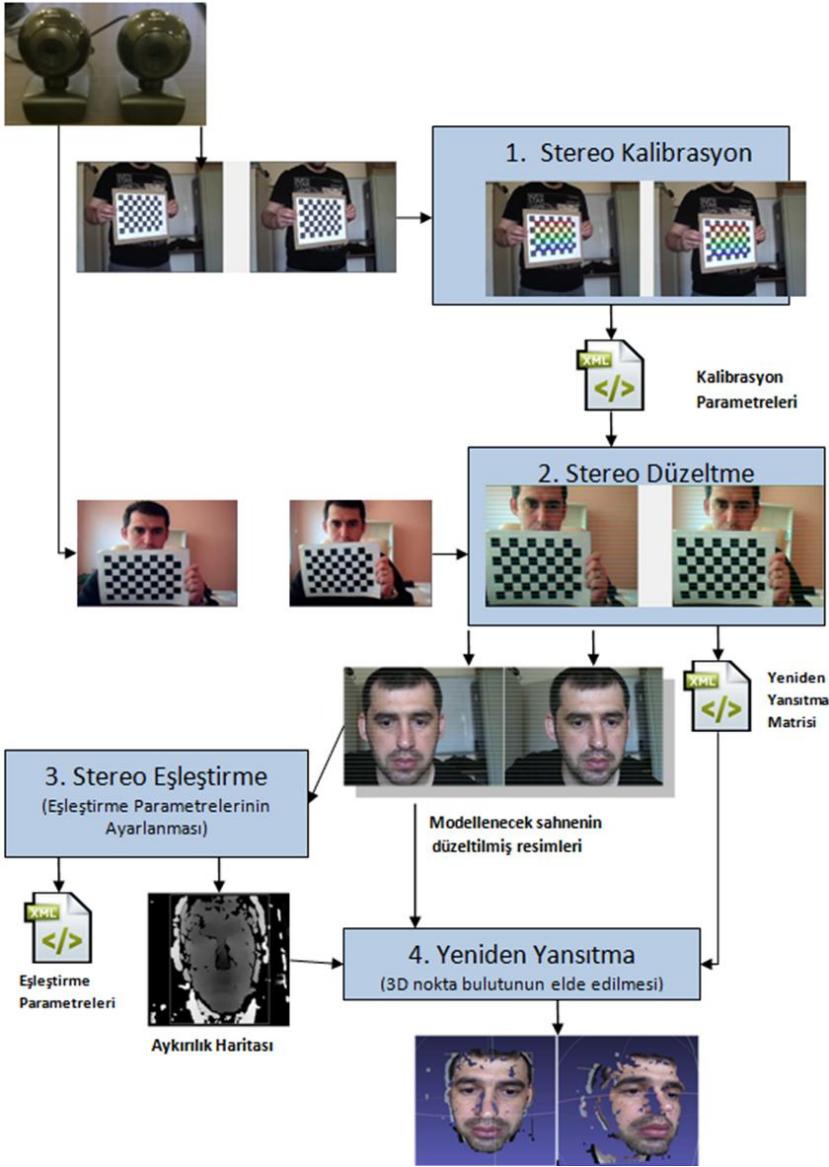
Yeniden yansıtma sonucunda sol resme göre bütün noktaların Z derinlik bilgisi elde edilmiş ve sahnenin 3-boyutlu gösterimini içeren XYZ formatında bir nokta bulutu elde edilmiş olur. Eğer 3-boyutlu modelleme yapılmak isteniyorsa,

bu noktalara ait renk bilgileri de referans alınan sol resimden alınarak nokta bulutuna eklenir. Renk bilgisi alınırken genel olarak RGB renk uzayı tercih edilmekte ve noktanın kırmızı, yeşil ve mavi renk düzeyleri ayrı ayrı alınmaktadır. Bu üç rengin birleşiminden noktanın gerçek rengi oluşturabilir.

4. SONUÇLAR

Gerçek dünyadaki sahnelerin ve nesnelerin derinlik bilgisini elde edebilmek ve 3-boyutlu modelini oluşturabilmek için bir stereo görüş sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilmiş olan sistem, iki farklı perspektiften sahneyi gören iki kameradan aldığı görüntüleri işleyip, gerekli kalibrasyon ve düzeltme işlemlerini uyguladıktan sonra, stereo eşleştirme ve üçgenleme yöntemini kullanarak derinlik analizini gerçekleştirmektedir.

Stereo görüş sisteminde derinlik haritası elde edilmesi ve 3-boyutlu modelleme yapılabilmesi için C# dili kullanılarak bir uygulama geliştirilmiştir. Görüntü 2 adet Logitech web kamera kullanılarak elde edilmiştir. Uygulama geliştirmede, sonuçları elde etme ve gösterim aşamalarında ayrıca OpenCV bilgisayarla görme kütüphanesinden, OpenCVSharp isimli .NET sistemi için OpenCV ara kütüphanesinden ve MeshLab programından yararlanılmıştır. Şekil 19'da stereo görüş sisteminin tüm adımlarını içeren akış diyagramı görülmektedir.



Şekil 19. Stereo Görüş Sistemi Akış Diyagramı

Stereo görüşün ilk aşaması olan kalibrasyon sonucu elde edilen parametreler, ikinci aşama olan stereo düzeltme sonucu elde edilen yeniden yansıtma matrisi ve eşleştirme parametreleri XML dosyalarında saklanmaktadır. Bu XML dosyaları sayesinde program sıfırdan çalıştırıldığında bu adımların tekrardan gerçekleştirilmesine gerek kalmadan derinlik bilgisi ve 3-boyutlu modelin oluşturulması mümkün olmaktadır.

Geliştirilen sistemde stereo eşleştirme için kullanılan blok eşleme algoritmasından en iyi sonucu almak için, eşleştirmede kullanılan parametrelerin değişiminin sonuçları gerçek zamanlı olarak aykırılık haritası üzerinde izlenebilmektedir. OpenCV’de tanımlı olan PreFilterCap, SADWindowSize, MinDisparity, NumberOfDisparities, TextureThreshold ve UniquenessRatio eşleştirme parametreleri C# arayüzünde bulunan kaydırma çubukları ile değiştirilmektedir. Bu sayede en iyi sonucu verecek parametreler hızlıca bulunabilmektedir. Bu yöntem sonucunda 3-boyutlu modellemenin başarımı arttırılmıştır.

Geliştirilen sistemin, derinlik analizini hızlı bir şekilde gerçekleştirdiğinden robot yöngüdümü, otonom sürüş, artırılmış gerçeklik (AR) ve sanal gerçeklik (VR) gibi alanlarda yapılan çalışmalara katkı sağlayabileceği değerlendirilmektedir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma danışmanlığı Deniz TAŞKIN tarafından yapılmış olan Murat Olcay ÖZCAN’a ait Doktora tez çalışmasından üretilmiştir.

6. REFERANSLAR

- Ambrosch K., Kubinger W. (2010). Accurate Hardware-based Stereo Vision. *Computer Vision and Image Understanding*, 114, 11, 1303-1316.
- Aydın T. (2011). Çifte Ağ Metoduyla Stereo, Odak Ve Bulanıklık Bilgisini Kullanarak Derinlik Çıkarımı. Doktora Tezi. Gebze İleri teknoloji Enstitüsü.
- Beşdok E. (2009). 3D Vision by using calibration pattern with inertial sensor and RBF Neural Networks. *Sensors*, 9, 6, 4572-4585.
- Boykov Y., Veksler O., Zabih R. (2001). Fast Approximate Energy Minimization via Graph Cuts. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 23, 11, 1222-1239.
- Bradski G., Adrian K. (2008). *Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library*. O'Reilly Media Inc.
- Candemir S. (2011). İstatistiksel Anlam Tabanlı Bilgisayarla Görme Uygulamaları. Doktora Tezi. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- Dattagupta A. (2012). Stereo Matching - Improving Image Quality. Yüksek Lisans Tezi. The University Of Texas.
- Dipanda A., Woo S., Marzani F., Bilbault J. M. (2003). 3-D Shape Reconstruction in an Active Stereo Vision System Using Genetic Algorithms. *Pattern recognition*, 36, 9, 2143-2159.
- Hager, Gregory D. (2003). Computer Vision Lecture Notes 11-12-13. 1 Kasım 2014 tarihinde <http://www.cs.jhu.edu/~hager/Public/teaching/cs461/StereoNotes.pdf> adresinden erişildi.
- Hartley R., Zisserman A. (2003). *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press.
- Hu Y. (2011). Research on a Three-Dimensional Reconstruction Method Based on the Feature Matching Algorithm of a Scale-Invariant Feature Transform. *Mathematical and Computer Modelling*, 54, 3, 919-923.
- Ikeuchi K. 2014. *Computer Vision: A Reference Guide*. Springer Publishing Company.
- Lazaros N., Sirakoulis G. C., Gasteratos A. (2008). Review of Stereo Vision Algorithms: From Software to Hardware. *International Journal of Optomechatronics*, 2, 4, 435-462.
- Lee H., Cho H. (2007). Stereo Moiré Technique: A Novel 3-D Measurement Method Using a Stereo Camera and a Digital Pattern Projector. *International Journal of Optomechatronics*, 1, 2, 209-230.

- Laganière R. (2011). OpenCV 2 Computer Vision Application Programming Cookbook: Over 50 Recipes to Master This Library of Programming Functions for Real-Time Computer Vision. Packt Publishing Ltd.
- Lipnickas A., Knyš A. (2009). A Stereovision System for 3-D Perception. Electronics and Electrical Engineering.—Kaunas: Technologija, 3, 91.
- Martull S., Peris M., Fukui K. (2012). Realistic CG Stereo Image Dataset with Ground Truth Disparity Maps. ICPR Workshop TrakMark 2012, 111, 430.
- May S., Pervoez K., Surmann H. (2007). Vision Systems - Applications. I-Tech Education and Publ. Chapter 11: 3D Cameras: 3D Computer Vision of Wide Scope 181-202.
- Memon Q., Sohaib K. (2001). Camera Calibration and Three-Dimensional World Reconstruction of Stereo-Vision Using Neural Networks. International Journal of Systems Science 32, 9, 1155-1159.
- Møller K. H. (2006). 3D Object Modelling via Registration of Stereo Range Data. Yüsek Lisans Tezi. Technical University of Denmark.
- Nakamura Y., Matsuura T., Satoh K., Ohta Y. (1996). Occlusion Detectable Stereo-Occlusion Patterns in Camera Matrix. Computer Vision and Pattern Recognition. Proceedings CVPR'96, 371-378.
- Savarese Silvio. (2014). Computer Vision Lecture Notes. Lecture 7. 1 Kasım 2014 tarihinde <http://web.eecs.umich.edu/~silvio/teaching/lectures/lecture7.pdf> adresinden erişildi.
- Scharstein D., Richard S. (2002). A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms. International Journal of Computer Vision, 47, 1, 7-42.
- Short N. J. (2009). 3-D Point Cloud Generation from Rigid and Flexible Stereo Vision Systems. Doktora Tezi. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Szeliski R. (2010). Computer Vision: Algorithms and Applications. Springer Publishing Company.
- Szeliski R., Weiss R. (1998). Robust Shape Recovery from Occluding Contours Using a Linear Smoother. International Journal of Computer Vision, 28, 1, 27-44.
- Treiber M. A. (2013). Optimization for Computer Vision: An Introduction to Core Concepts and Methods. Springer Publishing Company.
- Tsai R.Y. (1987). A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using of the Shelf TV Cameras and Lenses. IEEE Journal of Robotics and Automation, 3, 4, 323-344.

Wang Z.(2010). 3D Reconstruction Using a Stereo Vision System with Simplified Inter-Camera Geometry. Yüksek Lisans Tezi. University of Windsor.



BÖLÜM 21

Petrol ve Gaz Varlıklarının Yaşam Döngüsü: Enerji Geçişi Çağında Stratejik, Çevresel ve Politik Perspektiflerin Sistemantik Analizi

Nazan Yalçın Erik¹

1. Giriş

Petrol ve doğal gaz, sanayi devriminden bu yana küresel enerji sisteminin temelini oluşturmuş ve ekonomik kalkınmanın sürekliliğinde belirleyici bir rol oynamıştır. Ancak iklim değişikliğiyle mücadele, enerji arz güvenliğinin yeniden tanımlanması ve küresel sistemlerin karbonsuzlaştırılmasına yönelik artan baskı, bu kaynakların geleceğini ve yönetim biçimlerini köklü biçimde dönüştürmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı'nın (International Energy Agency – IEA, 2023) Net Sıfır 2050 senaryosu, fosil yakıtlara yönelik küresel talebin uzun vadede azalacağını öngörmekle birlikte, mevcut petrol ve gaz varlıklarının enerji arzı içerisindeki stratejik önemini koruyacağını göstermektedir. Bu durum, bu varlıkların tüm yaşam döngüsünün — keşiften hizmetten çıkarmaya kadar — teknik, çevresel ve yönetişimsel açıdan sorumlu biçimde yönetilmesini zorunlu kılmaktadır.

Petrol sistemlerinde “varlık yaşam döngüsü” kavramı, bir sahanın jeolojik araştırmalarla tanımlanmasından geliştirme, üretim, olgunlaşma ve nihai olarak hizmetten çıkarma veya yeniden kullanım aşamalarına kadar uzanan bütünsel bir süreci ifade eder (IEA, 2023). Etkin bir yaşam döngüsü yönetimi, yalnızca optimal hidrokarbon geri kazanımı ve ekonomik verimlilik sağlamakla kalmaz; aynı zamanda giderek sıkılaştan çevresel düzenlemelere, güvenlik standartlarına ve sosyal beklentilere uyumu da garanti altına alır (World Bank, 2022). Bu nedenle yaşam döngüsü yaklaşımı, enerji geçişi hedeflerinin uygulanabilirliği açısından temel bir yönetişim aracına dönüşmektedir.

Petrol ve gaz varlıklarının yönetimi, geleneksel olarak teknik ve operasyonel boyutlara odaklanmışken, günümüzde bu alan çok disiplinli bir yapıya evrilmiştir. Enerji geçişi politikaları, finansal risk yönetimi, çevresel-sosyal-yönetişim (ESG) kriterleri ve döngüsel ekonomi ilkeleri, varlık yönetiminin ayrılmaz bileşenleri haline gelmiştir. Bu bağlamda, yaşam döngüsünün her aşaması — keşif ve değerlendirmeden, geliştirme ve üretime, olgun saha

¹ Prof. Dr., Sivas Cumhuriyet Üniversitesi. ORCID: 0000-0001-7849-8660

yönetiminden hizmetten çıkarmaya kadar — teknolojik gelişmeler, ekonomik dinamikler ve çevresel etkiler açısından bütüncül biçimde değerlendirilmelidir.

Bu çalışma, petrol ve gaz varlıklarının yaşam döngüsünü enerji dönüşümü sürecinin bir parçası olarak incelemekte; karbon yakalama, kullanma ve depolama (CCUS), jeotermal dönüşüm ve hidrojen ekonomisi gibi düşük karbonlu teknolojilerin bu döngüye entegrasyonunu analiz etmektedir. Çalışma, enerji geçişi bağlamında varlık yönetiminin teknik, ekonomik ve çevresel boyutları arasındaki etkileşimi açıklayarak, sürdürülebilir enerji yönetişimi için kapsamlı bir çerçeve sunmayı amaçlamaktadır.

2. Arama ve Değerlendirme Aşaması: Teknolojik İlerlemeler ve Çevresel Sorumluluklar

Arama aşaması, hidrokarbon birikim alanlarının tanımlanması amacıyla yürütülen jeolojik, jeofizik ve jeokimyasal çalışmaların bir araya geldiği, petrol ve gaz yaşam döngüsünün en fazla belirsizlik ve yüksek riskli aşamasıdır. Geleneksel olarak iki ve üç boyutlu sismik veri toplama, kuyu karotlama ve rezervuar modelleme bu sürecin temel yöntemleri olmuştur. Ancak son yıllarda dijitalleşme, yapay zekâ (AI) ve veri analitiğine dayalı yaklaşımlar sayesinde bu alan büyük bir teknolojik dönüşüm geçirmektedir (Zhao vd., 2023).

2.1 Teknolojik Dönüşüm ve Yenilikçi Yaklaşımlar

Modern arama faaliyetleri, giderek artan ölçüde yapay zekâ destekli sismik görüntüleme, makine öğrenmesi tabanlı rezervuar karakterizasyonu ve jeostatistiksel modelleme tekniklerine dayanmaktadır. Derin öğrenme algoritmaları, büyük sismik veri setleri içindeki kalıpları analiz ederek hidrokarbon potansiyeli yüksek alanların belirlenmesinde insan yorumuna kıyasla çok daha yüksek doğruluk sağlamaktadır. Örneğin BP, Meksika Körfezi'ndeki saha çalışmalarında AI tabanlı analiz araçları kullanarak keşif verimliliğini önemli ölçüde artırdığını bildirmiştir (BP, 2024).

Bunun yanında “dijital ikiz” (digital twin) teknolojisi, fiziksel bir rezervuarın sanal kopyasının oluşturulmasına olanak tanıyarak farklı üretim senaryolarının modellenmesini ve keşif risklerinin azaltılmasını mümkün kılmaktadır. Bu tür dijital sistemler, yalnızca operasyonel karar süreçlerini hızlandırmakla kalmaz, aynı zamanda enerji verimliliğini ve maliyet optimizasyonunu da destekler. Böylece teknolojik dönüşüm, keşif aşamasının hem doğruluk düzeyini hem de sürdürülebilirliğini artıran temel bir unsur haline gelmiştir.

2.2 Çevresel ve Sosyal Etki Değerlendirmesi (ÇSED)

Arama faaliyetleri, özellikle hassas ekosistemlerde gerçekleştirildiğinde önemli çevresel etkiler doğurabilmektedir. Denizdeki sismik araştırmaların deniz canlıları üzerindeki potansiyel etkileri veya karadaki çalışmaların ekosistem

bütünlüğünü bozma riski, titizlikle düzenlenmesi gereken alanlardır. Bu nedenle arama aşaması, kapsamlı bir Çevresel ve Sosyal Etki Değerlendirmesi (ÇSED) sürecini zorunlu kılmaktadır.

ÇSED; biyolojik çeşitliliğin korunması, yerel toplulukların hakları, su kaynaklarının kirlenme riski ve atık yönetimi gibi unsurları içermelidir. Ayrıca “önleyici ilke” (precautionary principle), belirsizlik durumunda dahi çevresel zararın önlenmesine yönelik tedbirlerin alınmasını gerektiren temel bir yönlendirici çerçeve olarak öne çıkmaktadır (OECD, 2023). Günümüzde uluslararası finans kuruluşları, enerji projelerine yatırım yapmadan önce güçlü ÇSED kriterlerinin sağlanmasını ön koşul haline getirmiştir. Bu durum, çevresel performansın keşif sürecinin ayrılmaz bir bileşeni olarak kurumsallaştığını göstermektedir.

2.3 Ekonomik Değerlendirme ve Yatırım Riski

Arama aşaması, yüksek sermaye gereksinimi (capex) ve düşük başarı oranları nedeniyle enerji sektörünün en riskli safhalarından biridir. Ticari olarak üretilebilir bir rezervin bulunma olasılığı genellikle %10–20 civarındadır. Bu nedenle şirketler, yatırım kararlarını optimize etmek için gelişmiş portföy yönetimi stratejileri, olasılık temelli ekonomik modeller ve senaryo analizleri kullanmaktadır.

Petrol fiyatlarındaki dalgalanmalar ve küresel piyasa belirsizlikleri, bu aşamadaki yatırım davranışlarını doğrudan etkiler. Bu bağlamda dijital analiz araçları, büyük veri tabanlı tahmin modelleri ve risk optimizasyon yazılımları, ekonomik karar süreçlerinde kritik rol oynamaktadır. Böylece arama aşaması yalnızca jeolojik bir süreç olmaktan çıkarak, finansal sürdürülebilirlik ve çevresel sorumluluk arasında denge kurmayı hedefleyen çok boyutlu bir yönetim alanına dönüşmüştür.

3. Geliştirme ve Üretim: Sermaye Yoğun Yatırımdan Operasyonel Mükemmelliğe

Bir petrol veya gaz sahasının ticari fizibilitesi onaylandıktan sonra, yaşam döngüsünün en sermaye yoğun dönemi olan geliştirme ve üretim aşaması başlar. Bu dönem, toplam sermaye harcamalarının yaklaşık %70–80’ini oluşturur ve uzun vadeli ekonomik, çevresel ve sosyal etkileri bakımından stratejik bir öneme sahiptir (Wood Mackenzie, 2023).

3.1 Saha Geliştirme ve Altyapı Planlaması

Geliştirme aşaması, üretim tesislerinin (örneğin sabit platformlar, FPSO’lar, işleme ve depolama tesisleri) tasarımı, kuyu inşası (dikey, yatay veya çok kollu kuyular) ve boru hatları ile yardımcı altyapıların kurulumu gibi kapsamlı mühendislik faaliyetlerini içerir. Tasarım kararları; rezervuar özellikleri, su

derinliği, iklim koşulları, teknik riskler ve ekonomik optimizasyon parametrelerine göre belirlenir.

Son dönemde “modüler” ve “ölçeklenebilir” tesis tasarımları, yatırım riskini azaltmak ve değişken üretim koşullarına uyum sağlamak için yaygınlaşmıştır (IEA, 2023). Bu yaklaşım, özellikle uzak deniz (offshore) projelerinde yatırım geri dönüş süresini kısaltmakta ve enerji verimliliğini artırmaktadır. Aynı zamanda, karbon nötr hedeflerine uyumlu üretim altyapısının planlanmasını kolaylaştırmaktadır (IPIECA, 2023).

3.2 Üretim Optimizasyonu ve Dijitalleşme

Üretim aşaması, rezervuardan maksimum ekonomik geri kazanımı (Maximum Economic Recovery - MER) sağlamak amacıyla sürekli izleme, analiz ve optimizasyon gerektirir. “Akıllı saha (Digital Oilfield)” konsepti, sensör tabanlı veri toplama, gerçek zamanlı izleme, ileri analitik ve otomasyon teknolojileri sayesinde üretim sürecinin verimliliğini önemli ölçüde artırmıştır (Smith & Jones, 2023).

Tahmine dayalı bakım (predictive maintenance) sistemleri, ekipman arızalarını erken tespit ederek planlanmamış üretim kesintilerini minimize ederken, dijital ikiz (digital twin) uygulamaları üretim senaryolarının modellenmesine ve enerji tüketiminin optimize edilmesine olanak tanır. Ayrıca, IoT tabanlı veri ağları, sahanın operasyonel güvenliği ve enerji verimliliği üzerinde önemli iyileşmeler sağlamaktadır (World Economic Forum, 2021).

Dijitalleşme, yalnızca teknik bir yenilik değil, aynı zamanda karbon yönetimi stratejilerinin uygulanmasında da kilit rol oynamaktadır. Gerçek zamanlı veri analitiği, enerji tüketiminin izlenmesini ve emisyon azaltım fırsatlarının belirlenmesini kolaylaştırmaktadır.

3.3 Çevresel Yönetim ve Emisyon Kontrolü

Üretim aşaması, enerji tüketimi, atık yönetimi, metan (CH₄) sızıntıları ve su kullanımı açısından çevresel açıdan en yoğun süreçtir. Metan, kısa vadeli iklim etkisi bakımından karbondioksit'e kıyasla yaklaşık 84 kat daha güçlü bir sera gazıdır (IPCC, 2022). Bu nedenle, üretim faaliyetlerinde metan emisyonlarının izlenmesi, raporlanması ve azaltılması kritik önemdedir.

Uydu tabanlı izleme sistemleri, drone denetimleri ve sensör temelli algılama teknolojileri, emisyon kaynaklarını yüksek doğrulukla belirleme ve kontrol etme olanağı sunmaktadır (Zhang vd., 2021). Bununla birlikte, “Sıfır Yakma (Zero Flaring)” politikaları, değerlendirilemeyen gazın yakılmasını tamamen ortadan kaldırmayı amaçlamaktadır. Dünya Bankası öncülüğünde yürütölen “Küresel Gaz Yakma Azaltma Ortaklığı (GGFR)”, 2030 yılına kadar endüstride sıfır rutin yakma hedefini benimsemiştir (World Bank, 2022).

Ayrıca, karbon yakalama ve kullanma sistemlerinin (CCUS) üretim tesislerine entegre edilmesi, özellikle yüksek emisyonlu bölgelerde önemli bir azaltım stratejisi olarak değerlendirilmektedir (Bui vd., 2018).

3.4 Sosyal Lisans ve Yerel Katılım

Uzun süreli üretim faaliyetleri, yalnızca teknik başarıyla değil, aynı zamanda sosyal meşruiyetin sürdürülmesiyle de mümkündür. “Sosyal lisans (Social License to Operate)”, bir projenin yasal izinlerin ötesinde, yerel topluluklar tarafından kabul görmesi anlamına gelir. Yerel istihdamın teşvik edilmesi, tedarik zincirlerinde bölgesel işletmelere öncelik verilmesi ve sosyal yatırım programları, bu lisansın sürdürülebilirliğini destekleyen temel araçlardır (Poelzer vd., 2022).

Yerel içerik politikaları, sadece ekonomik kalkınmayı değil, aynı zamanda bilgi transferini ve uzun vadeli kapasite gelişimini de desteklemektedir. Bu bağlamda, şirketlerin çevresel ve sosyal sorumluluk uygulamaları, üretim aşamasında kurumsal itibarın ve sürdürülebilirlik performansının önemli bir göstergesi haline gelmiştir

4. Gerileme ve Olgun Saha Yönetimi: Değeri En Üst Düzeye Çıkarma ve Ömür Sonunu Planlama

Bir petrol veya gaz sahası, üretim zirvesine ulaştıktan sonra, rezervuar basıncının düşmesi ve suyun girmesi gibi faktörler nedeniyle doğal bir duraklama veya gerileme aşamasına girer. Bu aşama, sahanın ekonomik ömrünün sonu olmak zorunda değildir. Aksine, olgun saha yönetimi, nihai geri kazanımı en üst düzeye çıkarmak ve altyapının bütünlüğünü korumak için kritik bir stratejik disiplin haline gelmiştir.

İyileştirilmiş Hidrokarbon Geri Kazanımı (EOR): Olgun sahalarda, birincil ve ikincil kurtarma yöntemlerinden (doğal basınç, su basma) sonra genellikle rezervuarın %60-70'i yerinde bırakılır. İyileştirilmiş Hidrokarbon Geri Kazanımı (EOR) teknikleri, bu sıkışmış hidrokarbonların bir kısmını çıkarmak için kullanılır. Bu yöntemler kısaca:

Termal EOR: Rezervuar sıcaklığını artırmak ve petrolün viskozitesini azaltmak için buhar enjeksiyonu yapılarak gerçekleştirilir.

Kimyasal EOR: Petrol ve su arasındaki yüzey gerilimini azaltmak için polimer veya sürfaktan enjeksiyonu yapılarak gerçekleştirilir.

Gaz Enjeksiyonu: CO₂ veya doğal gaz enjeksiyonu. CO₂-EOR özellikle ilgi çekicidir çünkü aynı anda hem üretimi artırır hem de atmosferik CO₂'yi kalıcı olarak depolar, böylece CCUS için bir geçiş teknolojisi görevi görür.

Maliyet Optimizasyonu ve Operasyonel Verimlilik: Olgun sahalarda, gelirler düşerken operasyonel maliyetler (opex) artma eğilimindedir. Bu nedenle, maliyet optimizasyonu hayati önem taşır. Bu, operasyonları basitleştirmek, otomasyonu artırmak ve tedarik zincirlerini yeniden müzakere etmek anlamına gelebilir. "Şebeke optimizasyonu" ve "veri analitiği", enerji tüketimini azaltmak ve üretkenliği artırmak için kullanılır.

Varlık Bütünlüğü Yönetimi (Asset Integrity Management - AIM): Yaşlanan altyapı (boru hatları, platformlar), aşınma, korozyon ve yapısal yorgunluk riski taşır. Kapsamlı bir AIM programı, bu varlıkların güvenli ve çevresel açıdan sağlam bir şekilde çalışmaya devam etmesini sağlamak için düzenli denetimler, korozyon izleme ve yapısal analizler yürütür. Başarısızlık, ciddi kazalara, çevresel felaketlere ve büyük mali yükümlülöklere yol açabilir.

Hizmetten Çıkarma Planlaması: Olgunluk aşamasının en önemli yönlerinden biri, nihai hizmetten çıkarma için proaktif planlamadır. Hizmetten çıkarma maliyetlerinin tahmini ve bu maliyetlerin sahanın ömrü boyunca bir kenara ayrılması (provisioning), operatörler ve düzenleyiciler için finansal bir zorunluluk haline gelmiştir. Erken planlama, maliyetleri önemli ölçüde düşürebilir ve hizmetten çıkarma sürecini kolaylaştırabilir.

5. Hizmetten Çıkarma ve Terk Etme: Teknik, Finansal ve Çevresel Zorluklar

Hizmetten çıkarma, bir petrol veya gaz varlığının yaşam döngüsünün kaçınılmaz ve giderek daha önemli hale gelen son aşamasıdır. Kuyuların kalıcı olarak kapatılmasını, tesislerin sökülmesini, atık yönetimini ve sahanın eski haline getirilmesini veya başka bir amaçla kullanılmasını içerir.

Küresel Ölçek ve Maliyetler: Rystad Energy'ye (2024) göre, 2030 yılına kadar küresel hizmetten çıkarma harcamalarının 150 milyar ABD Doları'nı aşması beklenmektedir. Bu yük, özellikle Kuzey Denizi, Meksika Körfezi ve Asya-Pasifik gibi olgun ve derin havzalarda yoğunlaşmaktadır. Bu maliyetlerin büyüklüğü, hizmetten çıkarma sorumluluğunun hem şirketler hem de hükümetler için önemli bir finansal risk oluşturduğunu göstermektedir.

Teknik Süreçler:

Kuyu Kapatma ve Terk: Bu, kuyunun farklı jeolojik katmanları arasında hidrolik izolasyon sağlamak için çimento tıkaçların yerleştirilmesini içeren en kritik adımdır. Kötü yapılmış bir kapatma, yeraltı suyu kirliliğine veya yüzeye sızıntıya neden olabilir.

Tesis Sökümü (Decommissioning): Platformların, boru hatlarının ve diğer altyapıların sökülmesi karmaşık bir mühendislik operasyonudur. "Kısmi söküm" seçeneği (üst yapının çıkarılması, yeraltı sisteminin yerinde bırakılması) giderek

daha yaygın hale gelmektedir, ancak "tam sökülme" genellikle "temiz saha" (greenfield) yaklaşımı için tercih edilir. Yapay resif oluşturma, sökülen yapıların deniz tabanında bırakılarak deniz yaşamı için habitat oluşturduğu bir seçenektir.

Atık Yönetimi ve Geri Dönüşüm: Sökülen malzemelerin (çoğunlukla çelik ve beton) çevreye uygun bir şekilde yönetilmesi gerekir. Geri dönüşüm ve yeniden kullanım, hizmetten çıkarmanın çevresel ayak izini azaltmada ve döngüsel ekonomi ilkelerine katkıda bulunmada kilit bir rol oynar.

Finansal Güvence Mekanizmaları: Hizmetten çıkarma yükümlülüklerinin karşılanmaması, maliyeti vergi mükelleflerine yüklenebilecek "hayalet varlıklar" (orphaned assets) yaratabilir. Bu riski azaltmak için hükümetler, şirketlerin hizmetten çıkarma maliyetlerini karşılayacak yeterli fonu sağlamasını garanti altına alan finansal güvence mekanizmaları oluşturmuştur. Bunlar arasında teminat mektupları, güven fonları (trust funds), yedek akçe ayırma (sinking funds) veya üçüncü taraf garanti şirketleri bulunur. Bu mekanizmaların tasarımı, mali disiplini sağlarken şirketler için aşırı bir finansal yük de oluşturmamalıdır.

Düzenleyici Yasalar: Hizmetten çıkarma, sıkı bir şekilde düzenlenmiş bir süreçtir. İzinler, çevresel değerlendirmeler ve nihai site kapatma raporları gerektirir. Birleşik Krallık'taki Petrol Gazı Otoritesi (OGUK) veya ABD'deki İç Güvenlik Bakanlığı (BOEM/BSEE) gibi yasal kurumlar, endüstri standartlarını denetler ve uygular. Uyum, operatörler için itibar riski ve potansiyel yasal yaptırımlarla birlikte temel bir gerekliliktir.

6. Enerji Geçiş Politikalarıyla Entegrasyon: Varlık Rehabilitasyonu ve Dönüşüm

Enerji geçişi süreci, petrol ve gaz varlıklarının geleneksel yaşam döngüsü anlayışını köklü biçimde dönüştürmektedir. Günümüzde bir sahanın üretim ömrünün sonu, yalnızca hizmetten çıkarma (decommissioning) faaliyetleriyle sınırlı bir kapanış aşaması olarak değil, aynı zamanda mevcut altyapının ve yer altı jeolojik yapılarının düşük karbonlu enerji sistemlerine yeniden kazandırılması için stratejik bir fırsat alanı olarak değerlendirilmektedir. Bu dönüşüm, "altyapının yeniden amaçlandırılması" (infrastructure repurposing) ve "hizmetten çıkarma sonrası değer yaratımı" (post-decommissioning value creation) gibi yeni kavramsal yaklaşımları gündeme getirmiştir.

Bu çerçevede, terk edilmiş veya olgunlaşmış petrol ve gaz sahalarının karbon yakalama, kullanma ve depolama (CCUS), yeraltı hidrojen depolama veya jeotermal enerji üretimi gibi düşük karbonlu teknolojiler için yeniden kullanımı, enerji geçişi stratejilerinin önemli bir bileşeni haline gelmektedir (IEA, 2023; Ringrose & Meckel, 2019). Böylece, bir varlığın yaşam döngüsü yalnızca ekonomik ömrüyle değil, aynı zamanda çevresel ve sistemsel katkı potansiyeliyle de değerlendirilmektedir.

Dolayısıyla, enerji geçişi çağında yaşam döngüsü yönetimi, “sorumlu hizmetten çıkarma”dan “dönüştürücü yeniden kullanıma” evrilmekte; bu da enerji politikalarının, yatırım modellerinin ve düzenleyici çerçevelerin yeniden tanımlanmasını gerektirmektedir.

Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama (CCUS): Karbon yakalama, kullanma ve depolama (CCUS) teknolojileri, enerji geçişi sürecinde hem emisyon azaltımı hem de altyapı dönüşümü açısından stratejik bir bileşen haline gelmiştir.

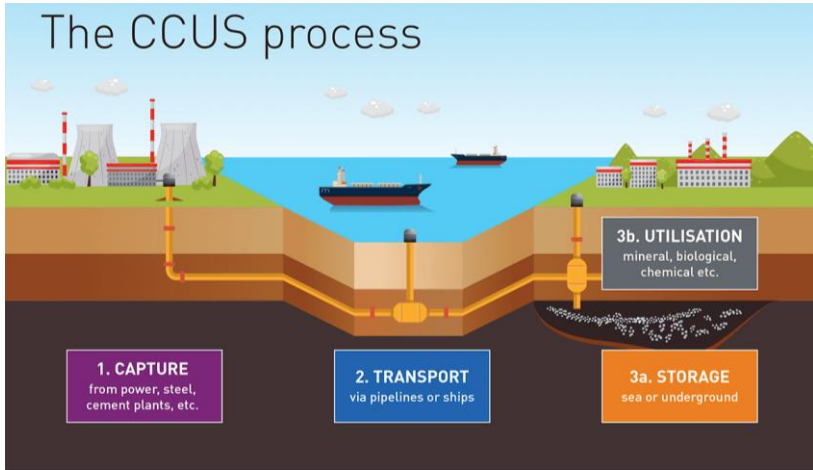
CCUS Nedir?

Karbon yakalama, kullanma ve depolama (CCUS), karbondioksitin atmosfere ulaşmasını durdurmak veya halihazırda atmosferde bulunan karbondioksiti uzaklaştırmak için kullanılan bir dizi yöntemdir (Şekil 1).

Fosil yakıtların yanması ve çimento veya çelik üretimi gibi bazı endüstriyel süreçler, çeşitli konsantrasyonlarda diğer gazlarla karışmış karbondioksit açığa çıkarır. Karbondioksiti konsantre formda çıkarmak için çeşitli yakalama teknolojileri kullanılır. Karbondioksit daha sonra depolanabilir veya kullanılabilir.

Karbon yakalama ve depolama (CCS) yönteminde, yakalanan karbondioksit çoğunlukla boru hattı veya gemi yoluyla karadaki veya denizdeki yer altı depolama sahasına taşınır ve derin tuzlu su tabakası veya tükenmiş petrol veya gaz sahası gibi uygun bir depolama rezervuarına pompalanır.

Şekil 1. Karbon yakalama ve kullanım (CCU) sisteminin başlıca aşamaları (<https://www.iogp.org/blog/news/developing-low-carbon-technologies/>)



Karbon yakalama ve kullanımında (CCU), yakalanan karbondioksit kullanılır. Karbondioksit, bir üründe (örneğin inşaat malzemelerinde) kalıcı olarak tutulabilir veya kalıcı depolama sağlayan bir işleme (geliştirilmiş petrol geri

kazanımı, EOR gibi) dahil edilebilir. Ayrıca, kullanılıp daha sonra salınabilir; örneğin, sentetik yakıt üretmek için kimyasal dönüşüm yoluyla fosil yakıt kullanımının yerini alabilir.

Günümüzde yaklaşık 45 ticari tesis, endüstriyel süreçlere, yakıt dönüşümüne ve güç üretimine karbon yakalama, kullanma ve depolama (CCUS) uygulayarak halihazırda faaliyettedir (<https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage>). CCUS dağıtımı geçmişte beklentilerin gerisinde kalmıştır, ancak son yıllarda CCUS değer zincirinde çeşitli geliştirme aşamalarında 700'den fazla proje ile ivme önemli ölçüde artmıştır. 2023'te, 2030 için açıklanan yakalama kapasitesi %35 artarken, açıklanan depolama kapasitesi %70 artmıştır. Bu, 2030'da yakalanabilecek toplam CO₂ miktarını yılda yaklaşık 435 milyon tona (Mt) ve açıklanan depolama kapasitesini yılda yaklaşık 615 Mt CO₂'ye getirir. Bu gelişmeler olumlu olmakla birlikte, 2050'ye kadar Net Sıfır Emisyon (NZE) Senaryosu'nda yakalanan ve depolanan yaklaşık 1 Gt CO₂'nin hala yalnızca %40'ı (ve sırasıyla %60'ı) civarındadır. CCUS ölçeğini büyütmenin bir yolu, karbondioksiti çeşitli kaynaklardan alıp ortak altyapı kullanarak taşıyan ve depolayan CCUS merkezlerine odaklanmaktır.

Tükenmiş petrol ve gaz rezervuarları, bu teknolojiler için en uygun jeolojik depolama ortamları arasında yer alır. Bu rezervuarların jeolojik özellikleri — gözeneklilik, geçirgenlik, tuzluluk ve özellikle geçirimsiz örtü kaya (caprock) varlığı — karbon dioksitin (CO₂) uzun vadeli güvenli depolanması için elverişli koşullar sunar (Ringrose & Meckel, 2019). Ayrıca bu alanlarda geçmiş üretim faaliyetleri sayesinde ayrıntılı jeolojik ve petrofiziksel veriler mevcut olduğundan, modelleme ve izleme süreçleri daha düşük belirsizlikle yürütülebilmektedir (Bui vd., 2018).

Mevcut üretim altyapısının — özellikle boru hatlarının, enjeksiyon kuyularının ve yüzey tesislerinin — yeniden kullanılması (repurposing), CCUS projelerinde hem sermaye maliyetlerini düşürmekte hem de karbon yönetimini hızlandırmaktadır (IEA, 2023). Sleipner (Norveç) ve Quest (Kanada) gibi büyük ölçekli projeler, tükenmiş rezervuarların CO₂ depolama açısından teknik olarak güvenli ve ekonomik olarak uygulanabilir olduğunu göstermiştir (Global CCS Institute, 2023).

CCUS, yalnızca enerji sektöründe değil, çimento, demir-çelik ve kimya gibi “zor azaltılabilir” (hard-to-abate) sektörlerde de sera gazı emisyonlarını düşürmenin temel yöntemlerinden biridir. Bu nedenle, teknoloji giderek yalnızca bir karbon azaltım aracı değil, aynı zamanda karbon nötrlüğe geçişin kritik bir altyapı unsuru olarak değerlendirilmektedir. Uzun vadede, doğrudan hava yakalama (DAC) ve karbon mineralizasyonu gibi yenilikçi yöntemlerle entegre edildiğinde, CCUS sistemleri karbon negatif operasyonlara ulaşılmasını mümkün kılacak potansiyele sahiptir (IEAGHG, 2022).

Dolayısıyla, CCUS'un etkin bir şekilde uygulanması; teknik fizibilitenin yanı sıra uygun düzenleyici çerçeveler, karbon fiyatlandırma mekanizmaları ve uzun dönemli izleme sistemlerinin bütünselik bir biçimde tasarlanmasını gerektirir. Bu da, tükenmiş hidrokarbon rezervuarlarının gelecekte düşük karbonlu enerji sistemlerinin jeolojik temel taşlarına dönüşmesini sağlamaktadır.

Jeotermal Enerjinin Yeniden Kullanımı: Tükenmiş petrol ve gaz sahaları, özellikle yüksek jeotermal gradyana sahip bölgelerde, yenilenebilir enerji üretimi için önemli bir yeniden kullanım potansiyeli sunmaktadır. Bu sahalarda bulunan mevcut kuyu altyapısı — kuyu delikleri, muhafaza boruları ve yüzey tesisleri — jeotermal enerji projeleri için yeniden değerlendirilebilir ve böylece sondaj maliyetlerinin %30–50'si oranında tasarruf sağlanabilir (Limberger vd., 2018). Bu yaklaşım, geleneksel hidrokarbon sahalarını “enerji geçişi varlıklarına” dönüştürerek, altyapı ömrünü uzatmakta ve döngüsel enerji ekonomisinin gelişimini desteklemektedir.

Teknik açıdan, bu dönüşüm özellikle yüksek ısı akısı ve jeotermal gradyan gösteren bölgelerde uygulanabilirlik kazanır. Tükenmiş rezervuarların gözenekli kayaç yapıları, yeraltı akışkanlarının dolaşımı ve ısı değişimi için uygun ortam sağlayabilir. Bu sayede, hem jeotermal ısı geri kazanımı (geothermal heat recovery) hem de jeotermal güç üretimi hedeflenebilir. Kuzey Denizi, Alberta Havzası (Kanada) ve Kaliforniya gibi bölgelerde yürütülen pilot projeler, hidrokarbon kuyularının jeotermal kullanıma başarılı biçimde dönüştürülebileceğini göstermiştir (Falcone vd., 2021; Hofmann vd., 2022).

Ekonomik olarak, mevcut altyapının yeniden kullanımı yalnızca yatırım maliyetlerini düşürmekle kalmaz, aynı zamanda enerji arz güvenliği ve yerel istihdamın korunması açısından da stratejik faydalar sağlar. Bu dönüşüm süreci, petrol ve gaz sektöründe çalışan mühendislerin ve teknisyenlerin becerilerini yenilenebilir enerji alanına aktararak adil geçiş (just transition) kavramının somut bir örneğini oluşturur. Böylece, düşük karbonlu enerji sistemlerine geçiş süreci hem çevresel hem de sosyo-ekonomik açıdan daha kapsayıcı bir çerçeveye kavuşur.

Bu bağlamda, tükenmiş kuyuların jeotermal enerji üretimi için yeniden kullanımı, yalnızca teknik bir fırsat değil, aynı zamanda enerji dönüşümünün altyapısal, ekonomik ve insani boyutlarını bütünleştiren yenilikçi bir strateji olarak değerlendirilmektedir.

Hidrojen Ekonomisi: Mevcut doğal gaz altyapısının hidrojen taşımacılığı için yeniden kullanımı, enerji geçişinin kritik unsurlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Yüksek basınçlı doğal gaz boru hatlarının hidrojen taşıması için teknik olarak dönüştürülmesi, ekonomik ve operasyonel açıdan değerlendirildiğinde, belirli koşullar altında uygulanabilirlik göstermektedir.

(Télessy, 2024). Ancak, bu dönüşümde boru hatlarının malzeme özellikleri, sızıntı önleme önlemleri ve hidrojen kaynaklı kırılma (hydrogen embrittlement) gibi faktörler titizlikle incelenmelidir (DNV, 2024).

Ayrıca, tükenmiş gaz rezervuarları ve tuz mağaraları gibi yer altı yapıları, hidrojenin büyük ölçekli depolanması için potansiyel çözümler sunmaktadır. Bu yapılar, enerji arz güvenliği ve talep dalgalanmalarının yönetimi açısından stratejik bir rol oynamaktadır (Williams, 2025). Özellikle, bu rezervuarların hidrojen depolama kapasitesi, gigawatt saat (GWh) ile terawatt saat (TWh) arasında değişen ölçeklerde değerlendirilmektedir (Williams, 2025).

Bunun yanı sıra, mavi hidrojen üretim süreçleri, mevcut doğal gaz işleme tesislerine entegre edilebilir. Doğal gazın buhar metan reformu (SMR) ile dönüştürülmesi ve eş zamanlı olarak karbon yakalama ve depolama (CCS) teknolojilerinin uygulanması, sera gazı emisyonlarını minimize etmekte ve mevcut altyapıdan maksimum faydayı sağlamaktadır (Ishaq, 2025). Özellikle, SMR ile üretilen mavi hidrojenin karbon emisyonları, CCS entegrasyonu sayesinde %95'e kadar azaltılabilmektedir (Shell, 2024).

Açık Deniz Rüzgârı için Sinerjiler: Petrol ve gaz endüstrisinin açık deniz mühendisliği, proje yönetimi, lojistik ve tedarik zinciri yönetimi konusundaki derin deneyimi, açık deniz rüzgâr enerjisi projeleri için stratejik bir avantaj sunmaktadır.

Bu sektörler arasındaki sinerjiler, altyapı entegrasyonu, mühendislik uygulamaları ve operasyonel verimlilik açısından önemli fırsatlar geliştirir. Özellikle, mevcut açık deniz petrol ve gaz platformlarının rüzgâr türbini temelleri veya elektrolizörler gibi yenilenebilir enerji bileşenleri için yeniden kullanılması, kurulum maliyetlerini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu tür dönüşümler, altyapı kullanımının optimizasyonu ve çevresel etkilerin azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır. Sonuç olarak, petrol ve gaz endüstrisinin açık deniz mühendisliği ve operasyonel deneyimi, açık deniz rüzgâr enerjisi projelerinin başarısı için kritik bir rol oynamaktadır.

Bu entegrasyonlar, petrol ve gaz varlıklarının ömrünü uzatabilir, hizmetten çıkarma maliyetlerini düşürebilir ve enerji geçişine önemli ölçüde katkıda bulunabilir. Ancak, teknik uygulanabilirlik, ekonomik fizibilite ve uygun düzenleyici çerçevelerin varlığı gibi zorluklar devam etmektedir.

7. Politika Belirleme ve Yönetim Süreçlerinin Değişimi

Petrol ve gaz varlıklarının sürdürülebilir bir şekilde yönetimi, hükümetler, endüstri, finans kuruluşları ve sivil toplum kuruluşlarını içeren çok seviyeli bir yönetim yaklaşımı gerektirir. Bu çok paydaşlı model, enerji geçişinde adaletin

sağlanması, ekonomik istikrarın korunması ve çevresel hedeflere ulaşılması açısından kritik öneme sahiptir.

Şeffaf Raporlama ve Risk Açıklama

Politika yapıcılar, şeffaf raporlama ve risk açıklama alanlarında teşvikler ve düzenlemeler yoluyla önemli bir rol oynamaktadır. İklimle İlgili Finansal Açıklamalar Görev Gücü (TCFD) ve halef kuruluşu olan Uluslararası Sürdürülebilirlik Standartları Kurulu (ISSB) gibi çerçeveler, şirketlerden iklimle ilgili riskleri açıklamalarını talep etmektedir. Bu çerçeveler, şirketlerin yönetim yapıları, stratejileri, risk yönetimi süreçleri ve performans göstergeleri hakkında bilgi sunmalarını öngörmektedir (fsb-tcfd.org). Bu, hizmetten çıkarma yükümlülükleri ve varlıkların erken terk edilme riski ("stranded assets") gibi konuları içermelidir. Şeffaflık, yatırımcıların riskleri değerlendirmesine ve sermayenin doğru yönlendirilmesine olanak tanır (ifrs.org).

Finansal Güvence Mekanizmalarının Güçlendirilmesi

Petrol ve gaz sektöründe hizmetten çıkarma yükümlülüklerinin etkin bir şekilde yerine getirilmesi, yalnızca çevresel sorumluluğun yerine getirilmesi için değil, aynı zamanda kamu mallarının korunması açısından da kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, hükümetler, finansal güvence rejimlerini düzenli olarak gözden geçirmeli ve güçlendirmelidir.

Küçük ölçekli işletmelerin hizmetten çıkarma yükümlülüklerini yerine getirmede karşılaştıkları finansal zorluklar, kolektif finansal modellerin önemini artırmaktadır. Bu modeller, küçük işletmelerin hizmetten çıkarma maliyetlerini paylaşmalarına olanak tanıyarak, finansal risklerini azaltmaktadır. Örneğin, Alberta, Kanada'da, terkedilmiş kuyuların hizmetten çıkarma maliyetlerini karşılamak için sektörel bir havuz fonu oluşturulmuştur. Bu fon, enerji sektöründeki işletmeler tarafından finanse edilmekte ve terkedilmiş kuyuların rehabilitasyonu için kullanılmaktadır (Vikipedi).

Karbon Fiyatlandırması ve Vergilendirme

Karbon fiyatlandırma mekanizmaları, petrol ve gaz sektöründe karbon yoğunluğunu azaltmak için etkili bir politika aracıdır. Emisyon ticareti sistemleri (ETS) veya karbon vergileri, şirketlere sera gazı emisyonlarını azaltma yönünde güçlü ekonomik teşvikler sunar. Bu mekanizmalar, karbon maliyetini operasyonel karar süreçlerine dahil ederek, düşük karbonlu teknolojilere ve süreç iyileştirmelerine yatırım yapılmasını teşvik eder (World Bank, 2024). Elde edilen karbon fiyatlandırma gelirleri, yalnızca şirket içi sürdürülebilirlik yatırımlarına değil, aynı zamanda enerji geçişinin sosyal etkilerini hafifletmeye de yönlendirilebilir. Örneğin, yenilenebilir enerji projeleri, enerji verimliliği iyileştirmeleri ve toplumsal destek programları, karbon gelirlerinin stratejik kullanımına örnek teşkil eder (OECD, 2023).

Karbon fiyatlandırması, ayrıca piyasa sinyallerini güçlendirerek, yatırımcıların ve paydaşların sera gazı azaltımını bir finansal performans kriteri olarak dikkate almasını sağlar. Böylece, sektör genelinde emisyon azaltımını hızlandırmak ve enerji geçişinin maliyet etkinliğini artırmak mümkün olur (IPCC, 2023).

Araştırma, Geliştirme ve Demonstrasyon (AR-GE&D) için Teşvikler

Hükümetler, CCUS, jeotermal yeniden kullanım ve yeşil hidrojen gibi dönüştürücü teknolojilerin AR-GE'sine yönelik finansman ve vergi teşvikleri sağlayabilir. Özel ortaklıklar bu tür yüksek riskli ancak yüksek getirili projeleri hızlandırmada çok önemli olabilir.

Sektörler Arası Entegrasyon ve Bölgesel İşbirliği

Enerji, ulaştırma ve sanayi politikalarının birbirleriyle uyumlu bir şekilde yürütülmesi, hidrojen ekonomisi gibi düşük karbonlu enerji sistemlerinin başarısı için kritik öneme sahiptir.

Bu entegrasyon, yalnızca enerji üretimi ve dağıtımıyla sınırlı kalmayıp, ulaştırma ve sanayi sektörlerini de kapsayan bütüncül bir politika çerçevesi gerektirir; yatırım planlaması, altyapı geliştirme, regülasyonlar ve teşvik mekanizmalarının eş zamanlı olarak tasarlanması bu sürecin temel bileşenlerini oluşturur.

Bölgesel işbirliği ise entegrasyon sürecinin etkinliğini artıran bir diğer önemli faktördür. Özellikle Kuzey Denizi gibi çok uluslu havzalarda, ülkeler altyapıyı ortak kullanabilir, teknik standartları ve regülasyonları düzenleyebilir ve en iyi uygulamaları paylaşarak yüksek maliyetli hizmetten çıkarma süreçlerinin ekonomik yükünü önemli ölçüde azaltabilir. Bu tür işbirlikleri yalnızca maliyet etkinliği sağlamakla kalmaz; aynı zamanda bölgesel enerji güvenliğini güçlendirir, inovasyonu teşvik eder ve karbon nötr hedeflere ulaşılmasını hızlandırır. Böylece hidrojen ekonomisi, yalnızca ulusal düzeyde değil, bölgesel ve küresel ölçekte sürdürülebilir bir enerji dönüşümünün merkezi bir bileşeni haline gelmektedir.

Adil Bir Geçişin Sağlanması

Petrol ve gaz sektöründen uzaklaşma süreci, bu sektörlerle ekonomik olarak bağımlı topluluklarda iş kayıpları, gelir düşüşleri ve sosyal uyum sorunlarına yol açabilir. Bu nedenle politikacıların ve hükümetlerin öncelikli görevi, enerji dönüşümü sürecinin toplumsal maliyetlerini minimize ederek "adil bir geçiş" güvence altına almaktır. Bu kapsamda, yeniden eğitim ve beceri geliştirme programları, iş gücünün yeni enerji ve sürdürülebilir sektörlerde istihdam edilebilirliğini artırır. Ayrıca, yerel ekonomilerde yeni yatırım fırsatlarının yaratılması, girişimcilik destekleri ve sosyal koruma mekanizmalarının güçlendirilmesi, geçiş sürecinin ekonomik ve sosyal etkilerini dengelemeye yardımcı olur.

Adil geçiş stratejileri, yalnızca doğrudan etkilenen işgücünü desteklemekle kalmaz; aynı zamanda bölgesel kalkınmayı teşvik eder, toplumsal dirençliliği artırır ve enerji dönüşümüne yönelik geniş tabanlı bir toplumsal destek sağlar. Böylece, adil bir geçiş yaklaşımı, sürdürülebilir enerji politikalarının hem ekonomik hem de sosyal boyutlarını bütüncül bir şekilde ele alan kritik bir araç olarak öne çıkar.

8. Sonuç

Petrol ve gaz varlıklarının yaşam döngüsünü yönetmek artık yalnızca teknik ve operasyonel bir faaliyet olmaktan çıkmış, iklim değışikliği, enerji güvenliği, ekonomik dayanıklılık ve politika inovasyonunun kesiştiği çok boyutlu ve dinamik bir süreç hâline gelmiştir. Bu makale, yaşam döngüsünün her aşamasının—keşiften üretime, üretimden hizmetten çıkarmaya veya dönüşüme kadar—benzersiz zorluklar ve fırsatlar sunduğunu ortaya koymaktadır. Dijitalleşme ve yapay zekâ, keşif ve üretim verimliliğini artırırken, katı çevresel yönetim ve sosyal lisans, operasyonel faaliyetlerin ayrılmaz bir parçası hâline gelmiştir. Olgun saha yönetimi, kaynak optimizasyonu açısından kritik önem taşıırken, hizmetten çıkarma, hem endüstri hem de düzenleyiciler için büyük finansal ve operasyonel bir yük olarak ortaya çıkmaktadır.

En umut verici gelişmelerden biri, geleneksel petrol ve gaz varlıklarının enerji geçişi altyapısına entegre edilmesidir. Karbon yakalama, depolama ve kullanım (CCUS), jeotermal enerji ve hidrojen projeleri, mevcut varlıklara yeni bir ömür kazandırırken, aynı zamanda küresel dekarbonizasyon hedeflerine ulaşma potansiyeli sunmaktadır. Ancak bu potansiyelin gerçekleşmesi, cesur ve ileri görüşlü politikaları gerektirir. Güçlü finansal güvence mekanizmaları, şeffaf risk açıklamaları, karbon fiyatlandırması, Ar-Ge teşvikleri ve sektörler arası işbirliği, sürdürülebilir bir varlık yaşam döngüsü yönetiminin temel taşlarını oluşturmaktadır. Bunun yanı sıra, enerji geçişinin toplumsal etkilerini dengeleyen ve hiçbir kesimi geride bırakmayan adil bir geçiş yaklaşımı sağlanmalıdır.

Sonuç olarak, petrol ve gaz endüstrisinin geleceği yalnızca yeni kaynaklar keşfetme kapasitesiyle değil, mevcut varlıklarını sorumlu bir şekilde yönetme, nihai olarak kapatma ve onları düşük karbonlu bir gelecek için yeniden icat etme yeteneğiyle de tanımlanacaktır. Bu dönüşüm, teknik uzmanlık, finansal inovasyon ve sağlam politikaların eş zamanlı olarak devreye girmesini gerektiren karmaşık bir süreçtir; ancak gezegenin sürdürülebilirliği ve uzun vadeli enerji güvenliği açısından hayati önem taşımaktadır.

Kaynakça

- Al-Mutar, M., & Williams, G. A. (2022). Decommissioning cost estimation and financial assurance in the offshore oil and gas industry. *Energy Policy*, 160, 112678.
- BP. (2024). *Energy Outlook 2024*. BP Global Publications.
- Brown, K., & Davis, R. (2022). Regulatory frameworks for decommissioning: A comparative analysis of the North Sea and Gulf of Mexico. *Energy Law Journal*, 43(1), 45–78.
- Bui, M., et al. (2018). Carbon capture and storage (CCS): The way forward. *Energy & Environmental Science*, 11(5), 1062–1176.
- DNV. (2024). Repurposing pipelines for hydrogen use. Erişim adresi: <https://www.dnv.com/article/repurposing-pipelines-for-hydrogen-use/>
- Financial Stability Board (FSB). (2023). İklimle ilgili finansal açıklamalar görev gücü (TCFD) raporu. Erişim adresi: <https://www.fsb-tcfd.org/recommendations/>
- Global CCS Institute. (2023). *Global status of CCS 2023*.
- International Association of Oil & Gas Producers (IOGP). (2021). *Decommissioning of offshore oil and gas installations: A comparative review of regulatory frameworks (Report No. 546)*.
- International Energy Agency (IEA). (2023). *Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector*. OECD/IEA.
- International Energy Agency (IEA). (2023). *World Energy Outlook 2023*. OECD/IEA.
- International Financial Reporting Standards (IFRS) Foundation. (2024). ISSB ve TCFD karşılaştırması. Erişim adresi: <https://www.ifrs.org/sustainability/tcfd/>
- International Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2022). *Geothermal energy: A guide to strategic planning*.
- IPIECA. (2023). *Net zero emissions in upstream operations: Guidance framework*. IPIECA Publications.
- Ishaq, H. (2025). Integrated natural gas reforming and CO₂ capture approach. *ScienceDirect*. Erişim adresi: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343724031750>

- Kjärstad, J., & Johnsson, F. (2009). Resources and future supply of oil. *Energy Policy*, 37(2), 441–464.
- Leveque, F. (2022). *The economics and politics of climate change*. Oxford University Press.
- Loughborough Üniversitesi. (2025). Birleşik Krallık petrol ve gaz şirketlerinin net sıfır geçişinde karşılaştığı gizli riskler. Erişim adresi: <https://www.lboro.ac.uk/media-centre/press-releases/2025/may/oil-gas-firms-face-net-zero-risk/>
- Massarutto, A. (2019). The long-term evolution of mature oil and gas regions: The role of the decommissioning phase. *The Extractive Industries and Society*, 6(3), 785–797.
- McGlade, C., & Ekins, P. (2015). The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2 °C. *Nature*, 517(7533), 187–190.
- Nøstbakken, L., & Bjørnland, H. C. (2022). Oil price volatility and the role of institutions. *Journal of Environmental Economics and Management*, 112, 102601.
- OECD. (2023). *Fiscal instruments for energy transition*. OECD Energy Policy Series.
- Oil & Gas UK (OGUK). (2023). *Decommissioning insight report 2023*.
- Poelzer, G., et al. (2022). Social license to operate in the energy transition: A critical review. *Energy Research & Social Science*, 89, 102539.
- Rystad Energy. (2024). *Global decommissioning outlook*.
- Shell. (2024). Blue hydrogen. Erişim adresi: <https://www.shell.com/business-customers/catalysts-technologies/licensed-technologies/refinery-technology/shell-blue-hydrogen-process.html>
- Smith, L. B., & Jones, P. T. (2023). Strategic management of mature assets: Maximizing value in a low-carbon future. Society of Petroleum Engineers (SPE), SPE-214567-MS.
- Télessy, K. (2024). Repurposing natural gas pipelines for hydrogen: Limits and opportunities. ScienceDirect. Erişim adresi: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319924027812>
- Task Force on Climate-related Financial Disclosures (TCFD). (2021). *Final report: Recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosures*. Financial Stability Board.
- The Hydrogen Council. (2023). *Hydrogen insights 2023: An update on the state of the global hydrogen economy*.
- Tilton, J. E., & Guzmán, J. I. (2016). *Mineral economics and policy*. RFF Press.

- U.S. Energy Information Administration (EIA). (2023). International Energy Outlook 2023.
- Van der Ploeg, F., & Rezai, A. (2020). The risk of policy tipping and stranded assets. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 175, 1–17.
- Williams, H. A. (2025). Hydrogen storage in depleted gas reservoirs with carbon dioxide as a cushion gas: Exploring lateral and vertical cushion gas separation strategies. *ScienceDirect*. Erişim adresi: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319924055848>
- Wood Mackenzie. (2023). Global upstream cost analysis 2023.
- World Bank. (2022). Sustainable oil and gas governance. Washington, D.C.: World Bank Group.
- World Economic Forum (WEF). (2021). The future of oil and gas: A framework for the energy transition.
- Zhang, D., et al. (2021). A review of methane emission measurement and management in the oil and gas industry. *Journal of Cleaner Production*, 305, 127077.
- Zhao, L., et al. (2023). AI-driven reservoir characterization in mature fields. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 226, 111404.