DOI: 10.5281/zenodo.23477371

MÜHENDİSLİK ALANINDA GÜNCEL GELİŞMELER VE TEMATİK İNCELEMELER

Editör
Prof. Dr. Selmin Ener Ruşen

Mühendislik Alanında Güncel Gelişmeler ve Tematik İncelemeler

Editör

Prof. Dr. Selmin Ener Ruşen

İmtiyaz Sahibi
Platanus Publishing®

Editör

Doç. Dr. Dilek Atik

Kapak & Mizanpaj & Sosyal Medya
Platanus Yayın Grubu

Birinci Basım
Ekim, 2026

Yayımcı Sertifika No
45813

ISBN

978-625-8513-99-8

©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: platanuskitap@gmail.com



Platanus Publishing®

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1..... 7

Dolusavaklarda Deşarj Kapasitesinin Nümerik Çözümlerle İncelenmesi
Şüheda Gökdaş
Zeyneb Kılıç

BÖLÜM 2..... 39

Malzeme Test Makinalarının Kuvvet Kalibrasyonu Ve Akreditasyonu
Bülent Aydemir

BÖLÜM 3..... 58

Başmakçı (Afyonkarahisar) Biyokütle Enerji Santralının Olası Çevresel Etkileri
Mehmet Özçelik

BÖLÜM 4..... 73

Gazipaşa İlçesi (Antalya/Türkiye) Kıyı Zonunda Sulama Amaçlı Su Sondajlarına Tuzlu Su Girişim Riskinin Araştırılması
Mehmet Özçelik

BÖLÜM 5..... 89

IoT Tabanlı Akıllı Otomasyon Sistemlerinde Yapay Zekâ ve Siber Güvenlik Yaklaşımları
Salih Erdurucan
İzzet Yavuz

BÖLÜM 6.....113

Tıbbi Görüntülemede Radyasyon Güvenliği: Alara Prensibi, Doz Optimizasyon Teknikleri ve Taek Mevzuatı Çerçevesinde Klinik Yaklaşımlar
Seda Demir

BÖLÜM 7.....141

Yara İyileşmesinin İzlenmesinde Giyilebilir Biyosensörler: Güncel Gelişmeler, Zorluklar ve Gelecek Perspektifleri
Esra Armağan

BÖLÜM 8.....171

P4 Programlama Dili: Temel Kavramlar, Mimari, Derleme ve Uygulam
Mert Öpöz
Tuna Göksu

BÖLÜM 9 205

Rüzgâr Santrallerinde Enerji Verimliliği ve Yapısal Ömür: Çok Amaçlı Optimizasyon Yaklaşımları Üzerine Tematik Bir İnceleme

Ece Türkoğlu
Deniz Türsel Eliiyi

BÖLÜM 10 235

Nano Partikül Takviyeli Polimer Nanokompozitlerin Aşınma Davranışı: Karşılaştırmalı Bir Değerlendirme

Yılmaz Küçük
İlkay Bardak

BÖLÜM 11 251

Jet Grout Yöntemi ile Zemin İyileştirme ve Tasarım Optimizasyonu

Metehan Yanık
Mustafa Vekli

BÖLÜM 12 271

Extreme Loading for Structures (ELS) ile Betonarme Yapıların Modellenmesi ve Aşamalı Göçme Analizi: Uygulama Adımları

Saffet Kılıçer

BÖLÜM 13 293

Yapı Malzemelerinde Yumurta Kabuğu Atığının Teknik ve Çevresel Açıdan Değerlendirilmesi

Ahmet Yavuz Şahin

BÖLÜM 14 315

Biyomedikal Uygulamalarda Biyoseramikler: Güncel Gelişmeler ve Gelecek Perspektifleri

Nurcan Çalış Açıkbaş
Gökhan Açıkbaş N

BÖLÜM 15 339

UHT Sütlerde ve UHT Organik Sütlerde Aflatoksin M_1 Varlığının Araştırılması

Nusret Deniz Okay
Yakup Can Sancak

BÖLÜM 16.....379

İleri Termal Yönetim Sistemlerinde Nanoakışkan Teknolojileri: Isı Transferi, Performans Artırımı ve Güncel Uygulamalar
Cuma Kılınç

BÖLÜM 17.....395

Ev Tipi Elektrikli Araç Şarj Cihazlarının Dağıtım Şebekelerinde Güç Kalitesine Etkileri
Özdemir Deniz

BÖLÜM 18.....421

Proteus ile Temel Elektronik Devrelerin Analizi
İzzet Yavuz
Salih Erdurucan

BÖLÜM 19.....429

Türkiye'de Sürdürülebilir Konut Tasarımında Kenevir ve Ahşap Esaslı Biyokompozitlerin Kullanım Potansiyeli
Aylin Özodabaş
Miraç Alaf

BÖLÜM 20.....447

İnsansız Hava Araçlarında Radar Görünürlüğü
Kerem Ayar
Cihat Aydın

BÖLÜM 21.....473

Yeşil Liman Karbonsuzlaştırma Unsurları
Mükerrem Fatma İlkışık

BÖLÜM 1

Dolusavaklarda Deşarj Kapasitesinin Nümerik Çözümlerle İncelenmesi

Şüheda Gökdaş[1]
Zeyneb Kılıç[2]

[1] YL Öğrencisi, Adıyaman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adıyaman, Türkiye ORCID: 0009-0006-8334-0917
[2] Doç. Dr., Adıyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adıyaman, Türkiye. ORCID: 0000-0003-4954-6955

1. GİRİŞ

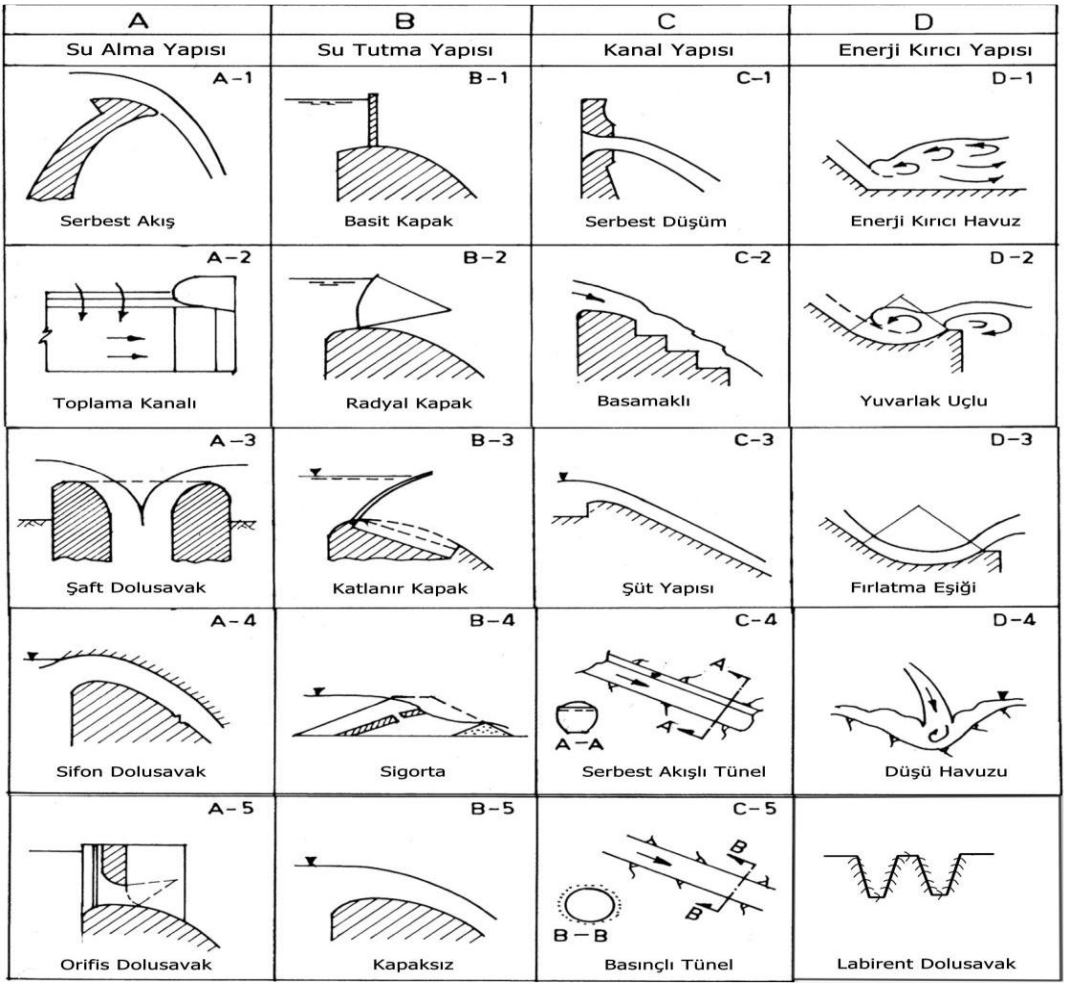
Barajlar, su kaynaklarının depolanması, taşkın kontrolü, enerji üretimi ve sulama gibi çok amaçlı kullanım için inşa edilen önemli su yapılarıdır. Bu yapıların güvenli bir şekilde işletilebilmesi için en kritik unsurlardan biri, taşkın sularının kontrollü bir şekilde mansaba iletilmesini sağlayan dolusavaklardır (Chanson, 2004). Dolusavakların hidrolik performansının doğru bir şekilde belirlenmesi, baraj güvenliği ve su kaynakları yönetimi açısından önemlidir. Bu çalışmada, farklı dolusavak tiplerinde (ogee, labirent, piano tuşu, basamaklı, şaft vs) deşarj kapasitesinin belirlenmesinde kullanılan nümerik yöntemler incelenerek derlenmiştir.

Şaft (şaft tipi) dolusavakları, dar vadilerde veya dik eğimli yamaçlarda inşa edilen barajlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu tip dolusavakların en önemli avantajı, nispeten düşük yüklerde maksimum kapasitelerine yaklaşabilmeleridir (USBR, 1987). Bu özellik, dolusavaktan maksimum çıkış debisinin sınırlandırılması gereken durumlarda önemli bir avantaj sağlamaktadır. Şaft dolusavakları, İran'da Sefid-Rood Barajı gibi büyük baraj projelerinde kullanılmıştır (Emami vd., 2012). Şaft dolusavakları, son yüz yılda hidrolik mühendisliği pratiğinde yüksek deşarj kapasitesi ve kompakt yapı gibi avantajları nedeniyle yaygın tercih edilmektedir (Wagner, 1954'ten aktaran Johnson, 1995). Modern hidrolik hesaplama teorisi, Wagner'in 1954 yılında keskin kenarlı dairesel bir dolusavak üzerinde yaptığı çalışmalara dayanmaktadır (Johnson, 1995). Geleneksel tasarım yaklaşımlarında, şaft dolusavağının drenaj yüzeyi, kesitte dairesel-silindirik ve boy kesitte dışbükey parabolik bir hat şeklinde kabul edilmektedir. Ancak bu kabul, inşaat teknolojisinin imkanlarıyla her zaman örtüşmemektedir (Khatsuria, 2005). Bu nedenle, proje drenaj yüzeyi, üst üste bindirilmiş kesik koniler sistemi ile yaklaşık olarak modellenmektedir. Bu durum, akışın drenaj yüzeyinden ayrılmasına ve vakum bölgelerinin oluşumuna neden olabilmektedir (Falvey, 1980).

Ogee (sabit kretli) dolusavaklar, en yaygın ve ekonomik dolusavak tiplerinden biridir. Bu dolusavaklar, büyük miktarda suyu geçirebilme kapasitesine sahiptir. Ogee dolusavağının önemli kısımlarından biri, suyu dolusavak profili üzerinden enerji kırıcı havuza ileten ters eğrilik bölgesidir (USACE, 1990). Bu bölgenin hidrolik performansı, dolusavağın genel verimliliğini doğrudan etkilemektedir.

Labirent dolusavaklar, geleneksel dolusavaklara göre daha yüksek deşarj kapasitesi sağlayan, nispeten düşük yüklerde büyük debileri geçirebilen yapılardır (Tullis vd., 1995). Labirent dolusavaklar, özellikle dolusavak genişliğinin sınırlı olduğu barajlarda tercih edilmektedir. Bu dolusavakların karmaşık üç boyutlu akış desenleri, hidrolik performanslarının belirlenmesini zorlaştırmaktadır (Crookston ve Tullis, 2013).

Bu çalışmanın temel amacı, farklı dolusavak tiplerinde deşarj kapasitesinin belirlenmesinde kullanılan nümerik yöntemleri incelemek, bu yöntemlerin avantaj ve sınırlamalarını değerlendirmek ve gerçek vaka çalışmaları üzerinden nümerik modellerin deneysel verilerle karşılaştırmalı analizini derleyerek sunmaktır.



Şekil 1. Dolusavak Tipleri

2. DOLUSAVAK TÜRLERİ VE HİDROLİK ESASLARI

2.1. Ogee Dolusavakları

Ogee dolusavağı, en yaygın ve ekonomik dolusavak tiplerinden biri olup, büyük miktarda suyu geçirebilme kapasitesine sahiptir. Ogee dolusavağı profili, USACE-WES'in tasarım esaslarına göre belirlenmektedir (Chanson, 2004). Dolusavak gövdesi bileşenleri şunlardır:

**Memba düşey düzlemi; *Dolusavak kretindeki eğrilik yarıçapları* ($0.2H_d$ ve $0.5H_d$ olan iki yay)*; *Dolusavak eğrisi* (denklem ile tanımlanan profil)*; *Doğrusal kısım; *Ters eğrilik* (akışı dolusavak gövdesinden enerji kırıcı havuza ileten bölüm)

Dolusavak gövdesi, aşağıdaki denklem ile tanımlanmaktadır (Chanson, 2004):

$$xn = KHd\ (1-n)\ y$$

Burada katsayılar K=2, n=1.85 ve Hd=5.08 cm olarak alınmaktadır. Dolusavak profilinin doğrusal kısmı 60 derece eğime (veya 1.73 : 1 eğim) sahiptir. Dolusavak profilini tanımlayan denklem şu şekildedir:

$$y= 0.1256\ x\ 1.85$$

2.2. Şaft Dolusavakları

Şaft dolusavağı, taşkın akışını yüksek bir seviyeden daha düşük bir seviyeye yüksek hızda ileten düşey ve yatay bir tünel iletim sistemidir (Chanson, 2004). Bu tip dolusavak, sifon dolusavaklarına benzemekle birlikte, işlevi farklıdır. Bu dolusavaklar, dar vadilerde, vadi kenarlarının dik eğimli olduğu durumlarda veya derivasyon tünellerinin bulunduğu yerlerde tasarlanıp inşa edilmektedir (Chanson, 2004). Şaft dolusavaklarının önemli bir avantajı, nispeten düşük yüklerde maksimum kapasitelerine yaklaşabilmeleridir. Bu özellik, dolusavaktan maksimum çıkış debisinin sınırlandırıldığı durumlarda ideal performans sağlamaktadır. Bu nedenle, bu dolusavaklar yeterince büyük rezervuara sahip barajlar için uygundur (Chanson, 2004). Nümerik model sonuçlarına göre, şaft dolusavağı kreti kontrol kesiti olarak işlev gördüğü sürece, kret profili üzerindeki akış, artan bir trend izleyerek kretin artan eğimine kadar dolusavak gövdesine yapışmakta, ardından gövdeden ayrılarak serbest düşüşle büküm sonuna ulaşmaktadır. Debi arttıkça, kreti aşan su tabakası kalınlaşmakta ve sonunda düşey bir su jetine dönüşmektedir (Chanson, 2004).

2.2.1. Poligonal Kesitli Şaft Dolusavaklar

Geleneksel dairesel kesitli şaft dolusavaklarının inşaat teknolojisi açısından dezavantajları, poligonal kesitli şaft dolusavaklarının geliştirilmesine yol açmıştır. Dairesel silindirik kesitli şaftın iç yüzeyinin poligonal bir kesitle değiştirilmesi, drenaj yüzeyinin tek yönlü eğriliğe sahip uzunlamasına takozlar sisteminden oluşmasını sağlamakta ve bu durum da kalıp imalatını kolaylaştırmaktadır (Chanson, 2004). Poligonal kesitler için kenar sayısının dörde bölünebilir olması gerekmektedir. Bu durumda olası poligonlar 4, 8 ve 12 kenarlıdır. Şaft dolusavak çıkışları, serbest akış modu için düz yan duvarlı ve tabanlı kesit olarak tasarlanmaktadır.

Tablo 1. Poligonal Kesitli Şaft Dolusavak Tipleri ve Uygulama Örnekleri

Proje Adı	Ülke	Kesit Tipi	Kenar Sayısı	Kenar Uzunluğu (m)	Tasarım Debisi (m^3/s)	Su Yükü (m)
Jedra HES	Cezayir	Dodekagonal	12	6,0	740	3,28
Daifa HES	Suriye	Oktagonal	8	5,40	366,7	2,59
Shakra HES	Suriye	Oktagonal	8	3,0	79,8	1,39
Kshatriya HES	Suriye	Oktagonal	8	3,94	106,7	1,29
Kadmus HES	Suriye	Oktagonal	8	2,50	46,3	1,14
Beitlel Hajj HES	Suriye	Tetragonal	4	8,66	126,6	1,59

Not: Chanson (2004), esas alınarak hazırlanmıştır.

2.3. Labirent Dolusavaklar

Labirent dolusavaklar, geleneksel dolusavaklara göre daha yüksek deşarj kapasitesi sağlayan, plan görünümde "katlanmış" lineer savaklardır (Bilhan vd., 2018). Bu dolusavaklar, özellikle dolusavak genişliğinin sınırlı olduğu barajlarda taşkın deşarj kapasitesini artırmak için kullanılmaktadır. Labirent dolusavağın hidrolik tasarımında optimize edilmesi gereken birçok geometrik değişken bulunmakta olup, bunlar; yan duvar açısı (α), toplam kret uzunluğu (L_{ef}), kret şekli, siklet sayısı (N), labirent sikletlerinin konfigürasyonu, labirent dolusavağın yönelimi ile yerleşimi. Labirent dolusavaktan geçen akış üç boyutlu karmaşık akış desenleri oluşturmakta olup, su seviyesi arttıkça dört farklı nap evresi gözlenmekte olup bunlar; tam havalandırılmış nap, kısmen havalandırılmış nap, geçiş nap, batık nap. Tam havalandırılmış akış koşulunda, nap kalınlığı ve mansap su derinliği labirent dolusavağın deşarj kapasitesini etkilememektedir. Su seviyesi yükseldikçe ve mansap suyu yükseldikçe, nap kısmen havalandırılmış hale gelmekte (dolusavak duvarına yapışmakta) ve debi katsayısı azalmaktadır (Bilhan vd., 2018).

Tablo 2. Labirent Dolusavak Türlerinin Geometrik Özellikleri

Model	Kanal Genişliği (cm)	Savak Yüksekliği (cm)	Kret Uzunluğu (cm)	Sikle t Sayısı	Tepsi Genişliği (cm)	Lc/w	Dolusavak Türü
1	196	10	294	3	8	1.50	Trapez Labirent (α=37°)
2	196	10	345	3	8	1.76	Trapez Labirent (α=30°)
3	196	10	427	3	8	2.18	Trapez Labirent (α=23°)
4	196	10	534	3	8	2.73	Trapez Labirent (α=18°)
5	196	10	621	3	8	3.17	Trapez Labirent (α=15°)
6	196	10	774	3	8	3,95	Trapez Labirent (α=12°)

Not: Bilhan vd., (2018) esas alınarak hazırlanmıştır.

Dairesel labirent dolusavaklar trapez labirent dolusavaklara alternatif olarak kullanılmaktadır. Bilhan vd., (2018) tarafından yapılan deneysel ve HAD çalışmalarında, dairesel labirent savakların hidrolik performansını detaylı olarak incelenmiş ve farklı geometrik parametrelerin deşarj kapasitesine etkisileri ortaya konulmuştur.

2.4. Basamaklı Dolusavaklar

Basamaklı dolusavaklar, enerji kırma verimliliğini artırmak için kretten mansap tarafına doğru basamaklar halinde düzenlenmiş dolusavaklardır. Savaktaki basamaklar, akışın enerjisini kademeli olarak kırarak mansap yapılarına olan yükü azaltmaktadır (Chanson, 2004). Farklı basamak düzenlemeleri, standart k-ε, RNG k-ε ve standart k-ω türbülans modelleri kullanılarak simüle edilmiştir.

2.5. Sifon Dolusavaklar

Sifon dolusavaklar, belirli bir su seviyesine ulaşıldığında otomatik olarak çalışmaya başlayan ve akışı sifon etkisiyle ileten yapılardır. Bu dolusavaklar,

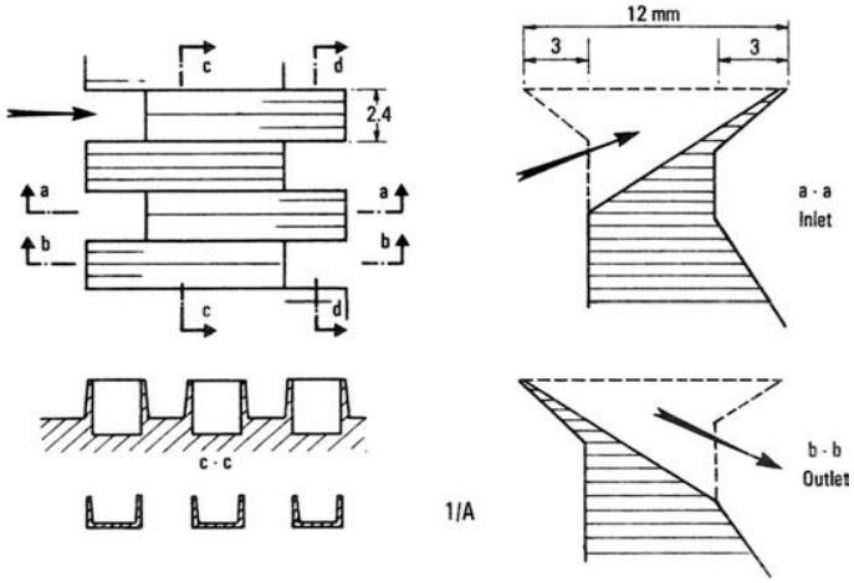
düşey ve yarı-düşey şaftlarla ilgili olarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir (Chanson, 2004).

2.6. Piyano Tuşu Savakları (Piano Key Weirs)

Piyano tuşu savakları, labirent dolusavakların geliştirilmiş bir versiyonu olarak 2000'li yılların başında ortaya çıkmış nispeten yeni bir dolusavak tipidir. Bu savaklar, adını piyano tuşlarını andıran geometrik yapısından almaktadır. Piyano tuşu savakları, geleneksel labirent dolusavaklara kıyasla daha kompakt bir yapıda olup, aynı genişlikteki bir alanda daha yüksek deşarj kapasitesi sağlayabilmektedir (Lempérière ve Ouamane, 2003). Kılıç (2021), piyano tuşu yan savakların hidrolik karakteristiklerini sayısal ve deneysel olarak analiz ettiği doktora tez çalışmasında, farklı geometrik konfigürasyonlar için deşarj katsayılarını belirlemiş ve piyano tuşu savaklarının geleneksel yan savaklara göre daha yüksek deşarj kapasitesine sahip olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 2. Gloriettes barajı piano tuşu savak inşasından görünüm



Şekil 3. A tipi Piano tuşu savak konfigürasyonu (Lempérière & Ouamane, 2003)

3. HESAP KRİTERLERİ VE DEBİ KATSAYILARI

3.1. Ogee Dolusavağında Debi Katsayısı

Ogee dolusavağında debi katsayısı, dolusavak profili, kret şekli ve akış koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Dolusavak üzerinden geçen debi, temel savak denklemi ile hesaplanmaktadır. Ogee dolusavağının ters eğrilik bölgesinde basınç dağılımı, eğrilik yarıçapına bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir (Chanson, 2004).

Nümerik çalışmalar, ters eğrilik yarıçapının artmasıyla maksimum basıncın önemli ölçüde azaldığını göstermektedir (Chanson, 2004). Sıfır eğrilik durumunda basınç artışı, akım çizgilerinin ani çarpışması ve bunun neden olduğu türbülanstan kaynaklanmaktadır. Ters profil eğriliği arttıkça, akım çizgilerinde türbülans oluşmakta ve maksimum basınç daha düşük bir değer göstermektedir (Chanson, 2004).

Tablo 3. Farklı Hd Oranları İçin Maksimum Basınç Denklemleri

Hd Oranı	Regresyon Denklemi	Korelasyon Katsayısı (R^2)
1,5	$(Pabs/Patm)max = 0,0045(r/Hd)^2 - 0,0226(r/Hd) + 1,037$	0,9981
1,0	$(Pabs/Patm)max = 0,0062(r/Hd)^2 - 0,0258(r/Hd) + 1,0325$	0,9950

0,75	$(Pabs/Patm)max = 0,0061(r/Hd)^2 - 0,0242(r/Hd) + 1,0285$	0,9874

Not: Chanson (2004) esas alınarak hazırlanmıştır.

3.2. Şaft Dolusavağında Debi Rejimleri

Şaft dolusavaklarında akış, üç farklı kontrol modunda incelenmektedir: kret kontrolü, orifis kontrolü ve boru (tam akış) kontrolü (Chanson, 2004). Bu kontrol modları, dolusavak üzerindeki su yüküne bağlı olarak değişmektedir.

Tablo 4. Şaft Dolusavağı Rating Eğrisi Sınıflandırması

Bölge	Su Yükü (m)	Debi Aralığı (m^3/s)	Kontrol Modu
1	0 - 6,1	460'a kadar	Kret kontrolü
2	6,1 - 8,00	460 - 840	Kret kontrolü (geçiş)
3	8,00 - 12,15	840 - 1120	Debi kontrolü değişimi (800 m^3/s'de)
4	12,15 - 18	1120 - 1240	Şaft ve büküm sonu kontrolü
5	> 18	> 1240	Tünelde tam akış kontrolü

Not: Chanson (2004) esas alınarak hazırlanmıştır.

Düşey şaft tamamen dolduğunda, dolusavak 1240 m^3/s debi için büküm sonunda tamamen sönümlenmektedir (Chanson, 2004).

3.3. Labirent Dolusavaklarda Debi Kapasitesi

Labirent dolusavaklarda debi kapasitesi, kret uzunluğu, yan duvar açısı, savak yüksekliği ve akış rejimine bağlı olarak değişmektedir. Labirent dolusavak üzerinden geçen debi, aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir (Bilhan vd., 2018):

$$Q=23\cdot Cd\cdot L\cdot 2g\cdot Ht1,5 \quad Q=32\cdot Cd\cdot L\cdot 2g\cdot Ht1,5$$

Bu denklemde; Q: Labirent dolusavaktan geçen debi, Cd: Labirent dolusavak debi katsayısı, L: Labirent dolusavağın efektif kret uzunluğu, Ht: Toplam yük ($h + V^2/2g$), g: Yerçekimi ivmesi

Debi katsayısı, savak kreti üzerindeki akış derinliği (h) ve savak yüksekliğine (P) bağlı olarak değişmektedir (Bilhan vd., 2018). Deneysel çalışmalar, farklı yan duvar açıları (α) için debi katsayısı değerlerini ortaya koymaktadır. α=12°'den

α=37°'ye kadar değişen açılar için debi katsayısı eğrileri elde edilmiştir (Bilhan vd., 2018).

Tablo 5. Debi Katsayısı Regresyon Denklemi Katsayıları (Trapez Labirent Dolusavak)

Model	A0	A1	A2	A3	A4	A5	R^2
α=12°	0,4598	2,8255	-17,296	40,718	43,59	17,273	0,9799
α=15°	0,4600	3,4773	-19,171	42,242	43,039	16,438	0,9848
α=18°	0,5638	2,1933	-12,876	29,283	30,857	12,090	0,9738
α=23°	0,6417	0,9673	-4,0152	5,7463	3,8338	0,8922	0,9608
α=30°	0,6395	1,5467	-8,3233	17,937	-18,184	6,9522	0,9620
α=37°	0,6537	1,6113	-8,6152	18,076	-17,719	6,5955	0,9790

Not: Bilhan ve diğerleri (2018) esas alınarak hazırlanmıştır.

3.4. Şaft Dolusavaklarında Vakum Oluşumu ve Kontrolü

Şaft dolusavaklarda vakum oluşumu; hidrolik performansı ve yapı güvenliğini etkileyen önemli bir faktördür. Bazı çalışmalarda farklı şaft yüzey profilleri için akış altı boşlukta basınç dağılımı incelenmiş ve bazı profillerde teorik olarak vakumsuz olmasına rağmen vakum oluştuğu tespit edilmiştir (Chanson, 2004).

Şaft dolusavaklarında kullanılan başlıca drenaj yüzeyi profilleri şunlardır:

Wagner Profili: Teorik olarak vakumsuz kabul edilmesine rağmen deneysel çalışmalarda vakum oluştuğu gözlemlenmiştir. *Eliptik Profil:* Diğer profillere kıyasla en düşük vakumu oluşturmaktadır. *Krieger Profili:* İlk şaft dolusavaklarında kullanılan eğri koordinatlarına sahiptir.

Vakumu azaltmak için eliptik drenaj yüzeyi profili önerilmektedir. Bu profil, diğer profillere kıyasla en düşük vakumu oluşturmaktadır. Dairesel silindirik kesitli şaftların poligonal kesitlerle değiştirilmesi, vakum oluşumunu azaltmakta ve inşaat teknolojisini basitleştirmektedir. Örneğin, Jedra HES için tasarlanan dodekagonal (12 kenarlı) şaft dolusavağında, Wagner koordinatlarına göre belirli bir debi katsayısı elde edilirken, eliptik drenaj yüzeyi sayesinde debi katsayısında artış sağlanmıştır (Chanson, 2004).

3.5. Piyano Tuşu Savaklarında Debi Kapasitesi

Piyano tuşu savaklarında debi kapasitesi, geometrik parametrelere bağlı olarak değişmektedir. Emiroğlu ve İkincioğulları (2016), dikdörtgen yan savakların deşarj kapasitesinin belirlenmesinde Schmidt yaklaşımını kullanmış ve bu yöntemin yan savaklar için uygun olduğunu göstermiştir.

Kılıç (2021), piyano tuşu yan savakların hidrolik karakteristiklerini sayısal ve deneysel olarak analiz ettiği doktora tez çalışmasında, farklı geometrik konfigürasyonlar için deşarj katsayılarını belirlemiştir. Çalışmada, piyano tuşu savaklarının deşarj kapasitesinin, giriş açıklığının çıkış açıklığına oranı (Wi/Wo),

kanal sayısı ve kret şekli gibi parametrelere bağlı olarak değiştiği ortaya konulmuştur (Kılıç, 2021).

Piyano tuşu savaklarında debi, temel savak denklemine benzer şekilde hesaplanmakla birlikte, geometrik karmaşıklık nedeniyle debi katsayısının belirlenmesi daha karmaşıktır. Bu nedenle, nümerik ve deneysel çalışmalar, piyano tuşu savaklarının hidrolik tasarımında önemli bir rol oynamaktadır (Lempérière ve Ouamane, 2003).

4. NÜMERİK ANALİZ METODOLOJİSİ

4.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Temelleri

Dolusavak akışlarının nümerik modellenmesinde temel olarak Navier-Stokes denklemleri kullanılmaktadır. Viskoz, sıkıştırılamaz akışkanlar için bu denklemler, Reynolds ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri formunda ifade edilmektedir (Chanson, 2004). HAD yöntemleri, karmaşık hidrolik yapıların tasarımında ve performans analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Versteeg ve Malalasekera (2007), sonlu hacim yöntemine dayalı HAD çözümlerinin temel prensiplerini kapsamlı bir şekilde ele almış ve mühendislik problemlerinde uygulanabilirliğini göstermiştir.

Süreklilik denklemi: $\partial\rho\partial t+\partial(\rho ui)\partial xi=0$

Momentum denklemi: $\partial ui\partial t+uj\partial ui\partial xj=-1\rho\partial P\partial xi+gi+1\rho\partial Sij\partial xj$

Bu denklemlerde:

ui: xi yönündeki hız bileşeni, P: Toplam basınç, ρ: Akışkan yoğunluğu, gi: xi yönündeki yerçekimi ivmesi, Sij: Gerilme tensörü

RANS denklemleri, türbülanslı akışların mühendislik uygulamalarında pratik bir şekilde modellenmesine olanak tanımaktadır. Bu denklemler, Navier-Stokes denklemlerinin zamansal ortalamasının alınmasıyla elde edilmekte olup, türbülans kaynaklı Reynolds gerilmelerinin modellenmesi için ek türbülans denklemlerine ihtiyaç duymaktadır (Versteeg ve Malalasekera, 2007).

4.2. Türbülans Modelleri ve Karşılaştırmaları

Dolusavak akışlarının nümerik modellenmesinde kullanılan başlıca türbülans modelleri aşağıda açıklanmıştır. Wilcox (2006), türbülans modellerinin teorik altyapısını kapsamlı bir şekilde ele almış ve farklı akış koşulları için uygun model seçimine yönelik rehberlik sağlamıştır.

4.2.1. RNG k-ε Türbülans Modeli

RNG (Re-Normalization Group) k-ε türbülans modeli, standart k-ε modeline göre çeşitli avantajlara sahiptir. Bu model, ε denkleminde ek bir terim içerdiğinden, hızlı gerinimli akışlar ve şaft dolusavağı gibi büyük geometrik değişimlere sahip yüzeylerdeki akışlar için iyileştirilmiştir (Chanson, 2004).

Yakhot ve Orszag (1986), RNG k-ε modelinin teorik temelini atmış ve bu modelin standart k-ε modeline göre daha geniş bir akış spektrumunda geçerli olduğunu göstermiştir.

RNG k-ε modeli, iki denklemli bir türbülans modelidir. Birinci denklem türbülans kinetik enerjisini (k), ikinci denklem ise türbülans yayılım oranını (ε) belirlemektedir (Chanson, 2004). Wilcox (2006), RNG modelinin özellikle akış ayrılması ve yeniden birleşme bölgelerinde standart k-ε modeline göre daha doğru sonuçlar verdiğini belirtmiştir.

Türbülans kinetik enerjisi denklemi:

$$\partial(\rho k)\partial t+\partial(\rho k u_i)\partial x_i=\partial\partial x_j[(\mu+\mu t\sigma k)\partial k\partial x_j]+Pk-\rho\varepsilon$$

Türbülans yayılım oranı denklemi:

$$\partial(\rho\varepsilon)\partial t+\partial(\rho\varepsilon u_i)\partial x_i=\partial\partial x_j[(\mu+\mu t\sigma\varepsilon)\partial\varepsilon\partial x_j]+C1\varepsilon*\varepsilon kPk-C2\varepsilon*\rho\varepsilon 2k$$

RNG k-ε türbülans modelinde kullanılan sabitler (Yakhot ve Orszag, 1986; Chanson, 2004):

C_μ=0,0845, $C_{1\varepsilon}$=1,42, $C_{2\varepsilon}$=1,68, σ_k=0,7194, σ_ε=0,7194, η_0=4,38, β=0,012

Yakhot ve Orszag (1986), RNG teorisi kullanarak bu sabitleri türetmiş ve modelin standart k-ε modeline kıyasla daha sağlam bir teorik temele sahip olduğunu göstermiştir.

4.2.2. Standart k-ε Türbülans Modeli

Standart k-ε modeli, endüstriyel akış problemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Wilcox, 2006). Ogee dolusavakları üzerinde yapılan çalışmalarda, k-ε türbülans modeli kullanılmış ve deneysel sonuçlarla uyum elde edilmiştir (Chanson, 2004). Versteeg ve Malalasekera (2007), standart k-ε modelinin geniş uygulama alanı ve iyi belgelenmiş yapısı sayesinde HAD uygulamalarında en çok tercih edilen türbülans modellerinden biri olduğunu belirtmiştir.

4.2.3. Standart k-ω Türbülans Modeli

Standart k-ω modeli, özellikle duvar sınırlı akışlar ve basamaklı dolusavaklar gibi ayrılma bölgelerinin bulunduğu akışlarda kullanılmaktadır (Chanson, 2004). Wilcox (2006), k-ω modelinin ters basınç gradyanı bölgelerinde ve duvar fonksiyonu gerektirmeyen yapısı sayesinde düşük Reynolds sayılı akışlarda standart k-ε modeline göre daha başarılı olduğunu vurgulamıştır.

Tablo 6. Türbülans Modellerinin Karşılaştırması

Türbülans Modeli	Avantajları	Dezavantajları	Kullanım Alanları
RNG k-ε	Hızlı gerinimli akışlar için iyileştirilmiş, büyük geometrik değişimlerde başarılı	Yüksek Reynolds sayılarında sınırlı	Şaft, ogee dolusavakları
Standart k-ε	Geniş uygulama alanı, iyi belgelenmiş	Dönel akışlarda zayıf	Genel HAD uygulamaları
Standart k-ω	Duvar sınırlı akışlarda başarılı	Serbest akışlarda zayıf	Basamaklı dolusavaklar

Not: Chanson (2004), Wilcox (2006) ve Versteeg ve Malalasekera (2007) esas alınarak hazırlanmıştır.

4.3. Serbest Yüzey Takip Yöntemleri (VOF)

Serbest yüzey akışlarının modellenmesinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biri, Hacimsel Akışkan Yöntemi yöntemidir. Bu yöntemde, su yüzey profilini elde etmek için α değişken fonksiyonu kullanılmaktadır (Chanson, 2004). Versteeg ve Malalasekera (2007), VOF yönteminin iki fazlı akışların modellenmesinde etkili bir yöntem olduğunu ve özellikle su-hava ara yüzeyinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanıldığını belirtmiştir.

α, hesaplama hücresindeki su hacminin bir parçasını temsil etmektedir:

$\alpha = 1$: Hücre tamamen su dolu $\alpha = 0$: Hücrede su yok (hava dolu)

$0<\alpha<1$: Hücrenin doluluk yüzdesini gösterir

Su yüzey profilinin belirlenmesinde α değeri genellikle 0,5 olarak alınmaktadır (Chanson, 2004). Hager (2010), VOF yönteminin savak ve dolusavak akışlarının modellenmesinde başarıyla uygulandığını ve deneysel sonuçlarla iyi uyum sağladığını rapor etmiştir.

4.4. Ağ Yapısı ve Optimizasyonu

Nümerik modellerde çözüm alanının ağ yapısı ve boyutlandırılması, model doğruluğunu etkileyen en önemli faktörlerden biridir (Versteeg ve Malalasekera, 2007). HAD modeli, katı sınırlar ve ağ oluşturma konusunda dikkatli bir optimizasyon gerektirmektedir (Chanson, 2004). Wilcox (2006), özellikle türbülanslı akışlarda duvar bölgesindeki ağ çözünürlüğünün model doğruluğu üzerinde belirleyici olduğunu vurgulamıştır.

Tablo 7. Nümerik Modelde Ağ Boyutları ve Hücre Sayıları

Yön	Toplam Hücre Sayısı	Minimum Hücre Boyutu	Maksimum Hücre Boyutu	Maksimum Komşu Hücre Oranı
X	130	0,399994 (i=19)	10,275 (i=1)	2,64583 (i=17)
Y	155	0,375 (j=26)	4,5 (j=1)	1,44 (j=26)
Z	200	0,526314 (k=171)	0,556297 (k=1)	1,00234 (k=178)
Toplam	**4.030.000**			

Not: Chanson (2004) esas alınarak hazırlanmıştır.

Nümerik modelde ağ boyutlandırması için çeşitli denemeler yapılmıştır. Başlangıçta 1 m³ hücre boyutları (2.500.000 hücre) ile yapılan denemede, şaft dolusavağı geometrisinin yeterince kapsanamadığı görülmüştür (Chanson, 2004). Daha sonra 0,75 m³ hücre boyutları denenmiş, ancak yine bazı geometrik detayların (dolusavak kenar kalınlığı) yetersiz kaldığı tespit edilmiştir. Son olarak, en uygun ağ boyutları 0,39 cm (X), 0,375 cm (Y) ve 0,52 cm (Z) olarak belirlenmiştir (Chanson, 2004). Versteeg ve Malalasekera (2007), ağ bağımsızlığı çalışmasının nümerik model güvenilirliği için zorunlu olduğunu ve optimum ağ yapısının çözüm doğruluğu ile hesaplama maliyeti arasındaki dengeden elde edildiğini belirtmiştir.

4.5. Sınır ve Başlangıç Koşulları

Nümerik modelde sınır koşullarının doğru tanımlanması, modelin fiziksel koşullarla uyumlu olması açısından kritik öneme sahiptir (Versteeg ve Malalasekera, 2007). Dolusavak modelinde kullanılan sınır koşulları aşağıda verilmiştir (Chanson, 2004).

Tablo 8. Dolusavak Nümerik Modelinde Sınır Koşulları

Sınır Bölgesi	Sınır Koşulu Türü	Açıklama
Geçirimsiz duvarlar	Wall	Sıfır kayma koşulu
Akış çıkış sınırı	Outflow	Serbest çıkış koşulu
Rezervuardan akış girişi	Velocity Inlet / Pressure Inlet	Tanımlı hız/basınç
Atmosfer sınırı	Pressure (Atmosfer)	Atmosfer basıncı
Simetri düzlemi	Symmetry	Akışın simetrik olduğu durumlar

Not: Chanson (2004) ve Versteeg ve Malalasekera (2007) esas alınarak hazırlanmıştır.

Başlangıç koşulu olarak, modelde bir akışkan yüksekliği tanımlanmakta ve simülasyon başlangıcında çözümün bir zaman adımı sonrasında model koşullarının sınır koşullarıyla eşleşmesi sağlanmaktadır (Chanson, 2004). Versteeg ve Malalasekera (2007), sınır koşullarının fiziksel gerçekliği yansıtması gerektiğini ve uygun olmayan sınır koşullarının çözümün kararsızlaşmasına veya hatalı sonuçlara yol açabileceğini vurgulamıştır.

4.6. Model Kalibrasyonu ve Doğrulama

Nümerik modelin kalibrasyonu ve doğrulaması, model sonuçlarının güvenilirliğini sağlamak için kritik bir adımdır (Versteeg ve Malalasekera, 2007). Bu aşamada, model çıktıları deneysel verilerle karşılaştırılmakta ve hata oranları hesaplanmaktadır (Chanson, 2004). Hager (2010), savak ve dolusavak akışlarının deneysel ve nümerik çalışmalarla doğrulandığında, bu modellerin hidrolik tasarım amaçları için güvenle kullanılabileceğini belirtmiştir. Novak ve diğerleri (2007), hidrolik yapıların tasarımında deneysel verilerin nümerik modellerin doğrulamasındaki önemini vurgulamış ve çeşitli dolusavak tipleri için kapsamlı deneysel veriler sunmuştur.

Akış gelişimi incelendiğinde, nümerik modelin başlangıcında (T=0,00 s) akışkan yükü tanımlanan ana verilere karşılık gelmektedir. Hesaplamalar başladığında (T=1 s), akış şaft dolusavağı yatağına yönelmektedir. T=2,5 s'de, akış baraj rezervuarından dolusavağın düşey şaftına ve ardından yatay şafta yönlendirilmektedir. T=20 s'de, dolusavak üzerinde kararlı olmayan akış etkisi belirginleşmektedir. T=40 s'de, nümerik modelde oldukça kalıcı bir akış oluşmakta ve T=50 s sonrasında tam kararlı akış gelişmektedir (Chanson, 2004).

Debi-zaman grafiği incelendiğinde, nümerik modelin rezervuarı boşaltmak ve model geometrisine uygun kararlı akış geliştirmek için yüksek debileri modelden uzaklaştırarak başladığı görülmektedir. Rezervuar ve giriş sınır koşulu arasında denge sağlandıktan sonra, nümerik modele giriş debileri 60 s'de oluşmaktadır. Bu durumda, kararlı akış giriş sınırında sadece 30 s sonra oluşmakta ve çıkış sınır koşullarının da dikkate alınması gerekmektedir (Chanson, 2004). Novak vd. (2007), benzer şekilde, nümerik modellerin kararlı akış koşullarına ulaşması için yeterli simülasyon süresinin tanımlanması gerektiğini belirtmiştir.

Nümerik modelin doğrulamasında kullanılan hata oranı denklemi (Chanson, 2004):

$$\text{Hata (\%)} = 100 \times \text{Xexp} - \text{XnumXexp}$$

Burada Xexp, parametrenin deneysel değerini, Xnum ise aynı parametrenin simüle edilmiş değerini ifade etmektedir. Versteeg ve Malalasekera (2007), nümerik model doğrulamasında birden fazla istatistiksel hatanın (ortalama mutlak hata, karekök ortalama hata vb.) kullanılmasını önermektedir. Hager (2010), deneysel ve nümerik sonuçlar arasındaki uyumun artırılması için ağ

duyarlılığı, türbülans modeli seçimi ve zaman adımı optimizasyonu gibi parametrelerin ayrı ayrı değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamıştır.

5. KULLANILAN YAZILIMLAR VE SAYISAL YÖNTEMLER

5.1. Flow-3D Yazılımı ve Özellikleri

Flow-3D, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) alanında yaygın olarak kullanılan bir yazılımdır. Şaft dolusavaklarının üç boyutlu nümerik modellemesinde başarıyla kullanılmaktadır (Chanson, 2004). Flow-3D, özellikle serbest yüzey akışlarının modellenmesinde güçlü araçlar sunmakta olup, dolusavak akışlarının karmaşık hidroliğini analiz etmek için uygun bir platform sağlamaktadır.

Flow-3D'nin temel özellikleri: *FAVOR (Fractional Area Volume Obstacle Representation) yöntemi:* Katı sınırların ve ağ yapısının modellenmesinde kullanılan özel bir yöntemdir (Chanson, 2004). Bu yöntem, karmaşık geometrilerin dikdörtgen ağ yapısı içinde doğru bir şekilde temsil edilmesine olanak tanımaktadır. *VOF (Volume of Fluid) yöntemi:* Serbest yüzey takibi için kullanılmaktadır. Versteeg ve Malalasekera (2007), VOF yönteminin iki fazlı akışların modellenmesinde endüstri standardı haline geldiğini belirtmiştir. *Çok bloklu ağ yapısı:* Farklı bölgelerde farklı ağ yoğunluğu kullanımına olanak sağlamaktadır. Bu özellik, hesaplama kaynaklarının verimli kullanılmasını sağlarken, kritik bölgelerde yüksek çözünürlük elde edilmesine imkan vermektedir. *RNG k-ε türbülans modeli:* Dolusavak akışları için optimize edilmiş türbülans modelidir. Yakhot ve Orszag (1986) tarafından geliştirilen bu model, hızlı gerinimli akışlar ve büyük geometrik değişimlerin bulunduğu bölgelerde standart k-ε modeline göre daha iyi performans göstermektedir.

Tablo 9. Flow-3D'de Kullanılan Ağ Blokları ve Özellikleri

Ağ Bloğu	Kapsama Alanı	Hücre Yoğunluğu
Blok 1	Su depolama alanı, düşey şaft ve büküm	Yüksek (ince hücreler)
Blok 2	Yatay tünel ve çıkış bölgesi	Orta
Blok 3	Rezervuarın uzak bölgeleri	Düşük (kaba hücreler)

Not: Chanson (2004) esas alınarak hazırlanmıştır.

Flow-3D, FAVOR yöntemi sayesinde karmaşık geometrilere sahip dolusavak yapılarının modellenmesinde avantaj sağlamaktadır. Özellikle şaft dolusavaklarının düşey şaft, büküm ve yatay tünel gibi karmaşık bileşenlerinin tek bir model içinde birleştirilmesinde etkili bir araçtır (Chanson, 2004).

5.2. Fluent/ANSYS CFD Yazılımı

Fluent, ANSYS yazılım paketinin bir parçası olan, akışkan akışı, ısı transferi ve kimyasal reaksiyonların modellenmesinde kullanılan çok amaçlı bir yazılımdır (Chanson, 2004). Endüstriyel HAD uygulamalarında en yaygın kullanılan yazılımlardan biri olan Fluent, geniş türbülans modeli yelpazesi ve güçlü çözücü algoritmaları ile bilinmektedir.

Fluent'in ogee dolusavağı modellemesinde kullanılan özellikleri:

Sonlu hacim yöntemi: HAD problemlerinin çözümünde güçlü bir yöntemdir. Versteeg ve Malalasekera (2007), sonlu hacim yönteminin korunum yasalarını sağlama konusundaki üstünlüğü nedeniyle akışkanlar dinamiği problemlerinde tercih edildiğini belirtmiştir.

VOF yöntemi: Serbest yüzey akışlarının modellenmesinde kullanılmaktadır. Hager (2010), VOF yönteminin savak ve dolusavak akışlarının modellenmesinde başarıyla uygulandığını rapor etmiştir.

RNG k-ε türbülans modeli: Dolusavak akışları için tercih edilen modeldir. Yakhot ve Orszag (1986) tarafından geliştirilen bu model, özellikle akış ayrılması ve yeniden birleşme bölgelerinde standart k-ε modeline göre daha doğru sonuçlar vermektedir.

2D ve 3D modelleme: Hem iki hem de üç boyutlu simülasyon imkanı sunmaktadır. Ogee dolusavağı modeli için geometri oluşturma ve ağ yapısı GAMBIT yazılımı kullanılarak yapılmaktadır. Dörtgen ağ yapısı tercih edilmekte olup, dolusavak profili yüzeyi gibi basınç gibi parametrelerdeki değişimlerin önemli olduğu alanlarda ağ boyutları diğer noktalardan daha küçük tutulmaktadır (Chanson, 2004). Wilcox (2006), türbülanslı akışlarda duvar bölgesindeki ağ çözünürlüğünün model doğruluğu üzerinde belirleyici olduğunu vurgulamıştır.

Tablo 10. Farklı Eğrilik Yarıçapları İçin Simülasyon Detayları

No	r/Hd=0	r/Hd=1	r/Hd=1,5	r/Hd=2	r/Hd=2,5	Akış Hızı (m/s)
1	3950	3939	4014	3897	3861	0,1025
2	3950	3939	4014	3897	3861	0,05539
3	3950	3939	4014	3897	3861	0,03566

Not: Chanson (2004) esas alınarak hazırlanmıştır.

Fluent, özellikle ogee dolusavaklarının ters eğrilik bölgesindeki basınç dağılımının incelenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Farklı eğrilik yarıçapları için yapılan simülasyonlar, ters eğrilik yarıçapının artmasıyla maksimum basıncın önemli ölçüde azaldığını göstermektedir (Chanson, 2004).

5.3. OpenFOAM Yazılımı ve Özellikleri

OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation), açık kaynak kodlu bir HAD yazılımı olup, dolusavak akışlarının modellenmesinde giderek artan bir

kullanım alanına sahiptir. Açık kaynak yapısı sayesinde, kullanıcıların çözücü algoritmalarını ve türbülans modellerini özelleştirmesine olanak tanımaktadır (Versteeg ve Malalasekera, 2007).

OpenFOAM'ın temel özellikleri: *Açık kaynak kodlu yapı:* Kullanıcıların kaynak koduna erişerek çözücüleri ve model parametrelerini değiştirebilmesine olanak tanır. *Sonlu hacim yöntemi:* Standart HAD çözüm yöntemini kullanmaktadır. *InterFoam çözücüsü:* VOF yöntemine dayalı iki fazlı (su-hava) akış çözücüsüdür. Serbest yüzey akışlarının modellenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. *Geniş türbülans modeli yelpazesi:* k-ε, k-ω, RNG k-ε, LES ve DES gibi çeşitli türbülans modellerini desteklemektedir. *Paralel hesaplama desteği:* MPI tabanlı paralel hesaplama ile büyük ölçekli simülasyonların verimli bir şekilde çalıştırılmasına imkan tanır.

OpenFOAM'ın dolusavak modellemesinde avantajları:

Özelleştirilebilirlik: Açık kaynak yapısı sayesinde, araştırmacılar mevcut türbülans modellerini değiştirebilir veya yeni modeller geliştirebilir. *Topluluk desteği:* Geniş bir kullanıcı topluluğu tarafından sürekli geliştirilmektedir. *Lisans maliyeti yok:* Ticari yazılımlara kıyasla önemli bir maliyet avantajı sağlar. *Esneklik:* Farklı ağ yapıları (yapısal, yapısal olmayan, hibrit) ve çözüm yöntemleri arasında seçim yapma imkanı sunar.

OpenFOAM'ın dolusavak akışlarının modellenmesinde kullanımı, özellikle akademik araştırmalarda giderek yaygınlaşmaktadır. interFoam çözücüsü, VOF yöntemi ile serbest yüzey takibi yaparak dolusavak üzerindeki su profili ve hava-su ara yüzeyinin belirlenmesinde başarılı sonuçlar vermektedir (Versteeg ve Malalasekera, 2007). Ayrıca, RNG k-ε türbülans modeli OpenFOAM içinde mevcut olup, dolusavak akışlarının modellenmesinde kullanılabilmektedir.

5.4. Diğer Nümerik Araçlar

Literatürde dolusavakların nümerik modellenmesinde kullanılan diğer yazılımlar şunlardır:

ADINA: Sonlu elemanlar yöntemi temelli bu yazılım, ogee dolusavaklarının modellenmesinde kullanılmaktadır. ADINA yazılımı ile k-ε türbülans modeli kullanılmış ve deneysel sonuçlarla uyum elde edilmiştir (Chanson, 2004). Sonlu elemanlar yöntemi, özellikle karmaşık geometrilere sahip yapıların modellenmesinde avantaj sağlamaktadır.

ANSYS CFX: Fluent'e alternatif olarak kullanılan bir HAD yazılımıdır. CFX, özellikle türbomakineler ve reaktif akışlar gibi özel uygulamalarda güçlü araçlar sunmaktadır (Versteeg ve Malalasekera, 2007). Dolusavak akışlarının modellenmesinde de kullanılabilmektedir.

SolidWorks / CATIA / AutoCAD: Geometrik model oluşturma aşamasında kullanılan yazılımlardır. Flow-3D ve diğer HAD yazılımlarına aktarılacak katı modeller bu yazılımlar kullanılarak hazırlanmaktadır (Chanson, 2004). Bu yazılımlar, dolusavakların karmaşık üç boyutlu geometrilerinin hassas bir şekilde oluşturulmasına olanak tanımaktadır.

Lattice-Boltzmann yöntemi: Katı-sıvı süspansiyonlarının simülasyonu için geliştirilmiş yeni bir tekniktir. Bu yöntem, Newton dinamiği ile ayrıklaştırılmış Boltzmann denklemini birleştirmekte olup, hesaplama maliyeti parçacık sayısıyla doğrusal olarak ölçeklenmektedir (Versteeg ve Malalasekera, 2007). Dolusavak akışlarının modellenmesinde henüz yaygın kullanım alanı bulmasa da, özellikle çok fazlı akışlar ve parçacık taşınımı içeren problemlerde gelecekte önemli bir potansiyele sahiptir.

5.5. Yazılım Karşılaştırması ve Seçim Kriterleri

Dolusavak akışlarının modellenmesinde kullanılacak yazılımın seçimi, problem tipine, mevcut hesaplama kaynaklarına ve araştırma hedeflerine bağlı olarak değişmektedir. Wilcox (2006), türbülans modeli seçiminin yanı sıra yazılımın sayısal algoritmalarının da çözüm doğruluğunu etkilediğini belirtmiştir.

Tablo 11. Dolusavak Modellemesinde Kullanılan HAD Yazılımlarının Karşılaştırması

Yazılım	Lisans Türü	Temel Yöntem	Serbest Yüzey Modeli	Türbülans Modelleri	Avantajlar
Flow-3D	Ticari	Sonlu Hacim (FAVOR)	VOF	RNG k-ε, k-ε, LES	Karmaşık geometrilerde başarılı, serbest yüzey takibi
ANSYS Fluent	Ticari	Sonlu Hacim	VOF	RNG k-ε, k-ε, k-ω, LES, DES	Geniş model yelpazesi, güçlü ağ oluşturma
ANSYS CFX	Ticari	Sonlu Hacim	VOF	k-ε, k-ω, SST, LES	Yüksek doğruluk, türbomakine uygulamaları
OpenFOAM	Açık Kaynak	Sonlu Hacim	VOF (interFoam)	RNG k-ε, k-ε, k-ω, LES, DES	Özelleştirilebilir, lisans maliyeti yok
ADINA	Ticari	Sonlu Eleman	VOF	k-ε	Yapısal analizle entegrasyon
OpenFOAM	Açık Kaynak	Sonlu Hacim	VOF (interFoam)	RNG k-ε, k-ε, k-ω, LES, DES	Özelleştirilebilir, lisans maliyeti yok

Not: Chanson (2004), Versteeg ve Malalasekera (2007) ve Wilcox (2006) esas alınarak hazırlanmıştır.

Yazılım seçiminde dikkate alınması gereken kriterler:

Problem geometrisi: Karmaşık geometriler için Flow-3D'nin FAVOR yöntemi avantajlıdır. *Türbülans modeli gereksinimi:* RNG k-ε modeli dolusavak akışları için önerilmektedir. *Hesaplama kaynakları:* Büyük ölçekli 3D simülasyonlar için paralel hesaplama desteği önemlidir. *Bütçe:* Ticari yazılımlar yüksek lisans maliyeti gerektirirken, OpenFOAM ücretsizdir. *Özelleştirme ihtiyacı:* Yeni model geliştirme veya mevcut modelleri değiştirme gereksinimi varsa, OpenFOAM tercih edilmelidir.

6. VAKA ÇALIŞMALARI

6.1. Haraz Barajı Şaft Dolusavağı Nümerik Modeli

6.1.1. Proje Tanıtımı

Haraz Nehri, İran'ın Mazandaran Eyaleti'nde bulunan kalıcı bir akarsu olup, Hazar Denizi Havzası'ndaki en önemli nehirlerden biridir. Nehir 185 km uzunluğunda olup, 4.100 km²'lik bir havza alanını kaplamaktadır. Haraz Nehri'nin yıllık ortalama debisi yaklaşık 1.100.000.000 m³'tür (Chanson, 2004).

Şaft dolusavakları, özellikle dar vadilerde ve yüksek barajlarda tercih edilen bir dolusavak tipidir. Bu yapılar, düşey bir şaft aracılığıyla suyu rezervuardan tahliye ederek, sınırlı alanda yüksek debi kapasitesi sağlamaktadır (Novak vd., 2007).

Tablo 12. Haraz Barajı ve Şaft Dolusavağı Özellikleri

Parametre	Değer
Dolusavak Türü	Serbest şaft
Dolusavak kret girişi dış çapı	35,80 m
Dolusavak kret girişi çevresi	75,36 m (360° için)
Dolusavak kret çapı	33,76 m
Dolusavak kret çevresi (dolusavak uzunluğu)	106 m (360° için)
Dolusavak kret kotu	502 m
Dolusavak profili yüksekliği	22 m
Düşey şaft kotu	480 m
Şaft çapı	8,30 m

Not: Chanson (2004) esas alınarak hazırlanmıştır.

Tablo 13. Düşey Şaft Detayları

Bölüm	Başlangıç Kotu	Bitiş Kotu	Uzunluk	Çap
(A) Düz kısım	457,08 m	436,91 m	38,17 m	8,30 m
(B) Konik kısım	436,91 m	426,91 m	10,00 m	8,30 m'den 7,5 m'ye

Not: Chanson (2004) esas alınarak hazırlanmıştır.

Tablo 14. Büküm Detayları

Parametre	Değer
Düşey yay başlangıç kotu	426,91 m
İç çap	7,5 m
Büküm taban kotu	408,6 m
Çıkış seviye yükü	5,13 m

Not: Chanson (2004) esas alınarak hazırlanmıştır.

Tablo 15. Ana Tünel Detayları

Parametre	Değer
Tünel başlangıç kotu	408,6 m
Tünel bitiş kotu	387,9 m
İç kesit	At nalı şeklinde
İç çap	7,5 m
Tünel eğimi	%3,89
Orifis sınırlayıcı tünel uzunluğu	546 m

Not: Chanson (2004) esas alınarak hazırlanmıştır.

Haraz Barajı şaft dolusavağı yapısı, baraj gövde eksenine 180 m mesafede, baraj gövdesinin sol tarafında yer almaktadır. Dolusavak, coğrafi olarak X=622982,08, Y=4012945,72 koordinatlarında merkezlenmiştir. Dolusavak kreti ve şaft profilleri, 3,6 m'lik su yükü ve H_s/R_s ile P/R_s oranları sırasıyla 0,3 ve 2 olacak şekilde tasarlanmıştır (Chanson, 2004). Novak ve diğerleri (2007), şaft dolusavaklarının tasarımında bu oranların hidrolik performans üzerinde belirleyici olduğunu vurgulamıştır.

6.1.2. Model Geometrisi ve Ağ Yapısı

Nümerik modelin geometrik yapısı, üç boyutlu katı modelleme yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Model, şaft dolusavağı ve düşey-yatay tünelleri, fiziksel modelin karakteristikleri ve geometrisi esas alınarak inşa edilmiştir (Chanson, 2004). Versteeg ve Malalasekera (2007), karmaşık hidrolik yapıların nümerik modellemesinde geometrinin doğru bir şekilde temsil edilmesinin

çözüm doğruluğu için kritik olduğunu belirtmiştir. Nümerik modelde üç ağ bloğu kullanılmıştır. Blok 1, şaft dolusavağının su depolama alanı, düşey şaft ve büküm bölgesini kapsamakta olup, en ince hücre boyutlarına sahiptir (Chanson, 2004). Wilcox (2006), türbülanslı akışların modellenmesinde, özellikle akış ayrılması ve yeniden birleşme bölgelerinde ağ çözünürlüğünün yeterli düzeyde olması gerektiğini vurgulamıştır.

6.1.3. Nümerik Model Sonuçları ve Doğrulama

Nümerik modelin kalibrasyonu ve doğrulaması, dört farklı debi için en önemli hidrolik parametreler kullanılarak yapılmıştır. Bu kapsamda, dolusavak kretindeki ortalama su derinliği, dolusavak çıkış debisi, kretteki ortalama akış hızı ve kretteki ortalama basınç parametreleri deneysel verilerle karşılaştırılmıştır (Chanson, 2004). Hager (2010), nümerik modellerin doğrulamasında birden fazla hidrolik parametrenin birlikte değerlendirilmesinin model güvenilirliğini artırdığını belirtmiştir.

Tablo 16. *Nümerik Model ve Deneysel Veri Karşılaştırması*

Run No	1	2	3	4	**Ortalama**
Q (m³/s) (Deneysel)	92	386	642	1240	
Q (m³/s) (Nümerik)	85,9	358	605	1165	
Hata %	6,7	7,3	5,8	5,9	**6,4**
H (m) (Deneysel)	2,2	5,3	7,2	18	
H (m) (Nümerik)	2,025	5,05	6,55	17,08	
Hata %	8,0	4,7	9,1	5,1	**6,7**
v (m/s) (Deneysel)	2,35	3,9	5,23	5,34	
v (m/s) (Nümerik)	2,17	3,51	5,02	5,01	
Hata %	7,7	10,0	4,2	6,2	**7,0**
p (Pa) (Deneysel)	5494	4316	1024	14520	
p (Pa) (Nümerik)	4981	3992	923	13550	
Hata %	9,3	7,5	9,9	7,2	**8,4**

Not: Chanson (2004) esas alınarak hazırlanmıştır.

Yukarıdaki tablodan görüldüğü gibi, nümerik modelin belirtilen sınır koşulları, ağ yapısı ve başlangıç koşulları altında kabul edilebilir hata yüzdeleri verdiği görülmektedir. Nümerik modelin çıkış debisini belirlemedeki ortalama bağıl hatası % 6,4, dolusavak kretindeki akış derinliği için %6,7, kretteki ortalama akış hızı için % 7,0 ve kretteki hidrostatik basınç için %8,4 olarak hesaplanmıştır (Chanson, 2004).

Versteeg ve Malalasekera (2007), HAD çalışmalarında %10'un altındaki hata oranlarının mühendislik uygulamaları için kabul edilebilir sınırlar içinde olduğunu belirtmiştir. Bilhan vd. (2018), dairesel labirent savaklar için yaptıkları HAD çalışmasında benzer hata oranları elde etmiş ve modelin güvenilir olduğunu rapor etmiştir.

6.2. Ogee Dolusavağında Ters Eğrilik Etkisinin İncelenmesi

6.2.1. Çalışma Metodolojisi

Bu çalışmada, ogee dolusavağının ters eğrilik profilinin eğriliğinin dolusavak yüzeyindeki basınca etkisi HAD yazılımı kullanılarak değerlendirilmiştir (Chanson, 2004). Bu amaçla, ters eğrilik profilinin beş farklı eğrilik yarıçapı (sıfır, 1, 1,5, 2 ve 2,5 Hd) dikkate alınmıştır.

Novak ve diğerleri (2007), ogee dolusavaklarının ters eğrilik bölgesinin tasarımında eğrilik yarıçapının basınç dağılımı üzerinde önemli bir parametre olduğunu vurgulamıştır.Ogee dolusavağı modeli için geometri oluşturma ve ağ yapısı, dörtgen ağ yapısı tercih edilerek oluşturulmuştur. Dolusavak profili yüzeyi gibi basınç değişimlerinin önemli olduğu alanlarda ağ boyutları diğer noktalardan daha küçük tutulmuştur (Chanson, 2004). Wilcox (2006), duvar bölgesindeki ağ çözünürlüğünün türbülanslı akışlarda basınç tahminleri üzerinde doğrudan etkili olduğunu belirtmiştir.

6.2.2. Sayısal ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

Nümerik çözümün laboratuvar sonuçları ile karşılaştırılması yapılmıştır. En yüksek mutlak hata, Hd=1,5 oranı için -21,7 mm olarak bulunmuştur (Chanson, 2004). Versteeg ve Malalasekera (2007), nümerik ve deneysel sonuçlar arasındaki farkların, türbülans modeli kaynaklı hatalar, ağ çözünürlüğü ve sınır koşullarının idealizasyonu gibi faktörlerden kaynaklanabileceğini belirtmiştir.

Farklı ters eğrilik yarıçapları için su yüzey profilleri karşılaştırıldığında, eğrilik yarıçapının artmasıyla su yüzey profilinin daha yumuşak bir geçiş sergilediği görülmektedir. Bu durum, akış ayrılmasının gecikmesi ve enerji kayıplarının azalması açısından olumlu bir etki olarak değerlendirilmektedir (Chanson, 2004).

6.2.3. Basınç Dağılımı Sonuçları

Eğrilik yarıçapının artmasıyla maksimum basıncın önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir (Chanson, 2004). Sıfır eğrilik durumunda basınç artışı, akım çizgilerinin ani çarpışması ve bunun neden olduğu türbülanstan kaynaklanmaktadır. Ters eğrilik yarıçapı arttıkça, akım çizgilerinde türbülans oluşmakta ve maksimum basınç daha düşük bir değer göstermektedir. r/Hd=2,5 değerinde basınç %2,46 oranında azalmaktadır (Chanson, 2004). Hager (2010), ogee dolusavaklarında basınç dağılımının kavitasyon riskinin değerlendirilmesinde kritik bir parametre olduğunu ve tasarım aşamasında dikkate alınması gerektiğini vurgulamıştır.

Tüm eğrilik değerlerinde ortalama basınç önemli bir değişim göstermemiştir. Ancak, maksimum basıncın eğrilik yarıçapının artmasıyla azalması, ekonomik hususlarla birlikte değerlendirilmelidir, çünkü eğrilik yarıçapının artması inşaat maliyetlerini de artırmaktadır (Chanson, 2004). Novak ve diğerleri (2007), hidrolik yapıların tasarımında hidrolik performans ile inşaat maliyeti arasında optimum dengenin sağlanması gerektiğini belirtmiştir.

6.3. Labirent Dolusavaklarda Nap ayırıcı Etkisi

6.3.1. Deneysel Çalışma Metodolojisi

Labirent dolusavakların debi kapasitesi ve akış karakteristikleri üzerine deneysel çalışmalar, hidrolik laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği; su toplama havuzu, pompa sistemi, debi tankı, dikdörtgen kanal, dijital debimetre ve labirent dolusavaktan oluşmaktadır (Bilhan ve diğerleri, 2018).

Deneylerde kullanılan başlıca ekipmanlar şunlardır (Bilhan ve diğerleri, 2018): 250 mm çaplı besleme hattı ve pompa sistemi, Elektromanyetik debimetre, Dijital nokta ölçer (±0,01 mm hassasiyet), Akustik üç eksenli hız ölçer.

Emiroğlu ve İkincioğulları (2016), yan savakların deşarj kapasitesinin belirlenmesinde deneysel ölçümlerin güvenilirliğinin, kullanılan ölçüm ekipmanlarının hassasiyetine doğrudan bağlı olduğunu vurgulamıştır.

6.3.2. Nap ayırıcı Etkisinin Değerlendirilmesi

Nap ayırıcı'lar, kret üzerinde düzenli aralıklarla yerleştirilen ve nap salınımını ortadan kaldırmak için kullanılan elemanlardır. Nap ayırıcı'lar, sürekli yanal nap profilinde bir kırılma oluşturarak, nap arkasındaki sıkışmış hava cebini atmosfer basıncına havalandırmaktadır (Bilhan vd., 2018).

Tablo 17. Trapez Labirent Dolusavaklarda Nap ayırıcı Etkisi

Yan Duvar Açısı (α)	Nap ayırıcı'sız Cd	Nap ayırıcı'lı Cd	Azalma Oranı (%)
12°	0,75 - 0,85	0,73 - 0,83	%0,5 - %1,0
15°	0,72 - 0,82	0,70 - 0,80	%1,0 - %2,0
18°	0,68 - 0,78	0,66 - 0,76	%2,0 - %2,5
23°	0,65 - 0,75	0,63 - 0,73	%2,5 - %3,0
30°	0,60 - 0,70	0,58 - 0,68	%3,0 - %3,5
37°	0,55 - 0,65	0,53 - 0,63	%3,5 - %3,8

Not: Bilhan ve diğerleri (2018) esas alınarak hazırlanmıştır.

Deney verileri, trapez labirent dolusavaklarda nap ayırıcı'ların debi katsayısını α=12° için %0,5 - α=37° için %3,8 aralığında azalttığını göstermektedir. Dairesel labirent dolusavaklarda ise bu azalma yaklaşık %2 civarındadır (Bilhan ve diğerleri, 2018). Bu sonuçlar, nap ayırıcı'ların labirent savakların hidrolik performansı üzerinde geometriye bağlı olarak değişen bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

6.3.3. Farklı Geometrilerin Karşılaştırması

Deney sonuçları, aynı kret uzunluğuna sahip trapez labirent dolusavakların (α=37°, L=294 cm) dairesel labirent dolusavaklardan (L=294 cm) daha yüksek debi kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, tüm labirent dolusavak türleri, lineer savaklardan (L=196 cm) daha yüksek debi kapasitesi sunmaktadır (Bilhan vd., 2018). Lempérière ve Ouamane (2003), labirent savakların lineer savaklara göre aynı kret uzunluğunda daha yüksek debi kapasitesi sağladığını ve bu nedenle sınırlı alan koşullarında avantajlı olduğunu belirtmiştir.

Deneysel sonuçlar, Woronora Barajı, Boardman Barajı ve Avon Barajı prototip verileri ile diğer araştırmacıların verileriyle karşılaştırıldığında, debi katsayısı değerlerinin genel eğilimlerinin benzer olduğu görülmektedir (Bilhan vd, 2018). Bu karşılaştırma, labirent savakların hidrolik performansının ölçek etkilerinden bağımsız olarak tutarlı olduğunu göstermektedir. Hager (2010), hidrolik model çalışmalarında prototip verileriyle karşılaştırma yapmanın modelin güvenilirliğini artırdığını vurgulamıştır.

6.4. Poligonal Kesitli Şaft Dolusavak Tasarımları

6.4.1. Dodekagonal Kesitli Şaft Dolusavağı (Cezayir - Jedra HES)

Cezayir'deki Jedra HES için tasarlanan dodekagonal (12 kenarlı) şaft dolusavağı, hidrolik model üzerinde incelenmiştir. Proje verilerine göre, p=%0,01 su temini, Qp=740 m³/s hesaplanan dönüştürülmüş debi, Wagner koordinatlarına göre çizilen başlıktan m=0,44 debi katsayısı ve H=3,28 m yük ile akmalıdır (Lempérière ve Ouamane, 2003).Model çalışmaları için, kenar uzunluğu b=6,0 m olan dodekagonal kesitli şaft, dairesel-silindirik başlık ve eliptik drenaj yüzeyi seçilmiştir. Araştırma verilerine göre, maksimum debi

katsayısı m=0,517 olarak bulunmuştur. Bu değer, taşkın dönüşümü dikkate alındığında, Qp = %0,01 = 636 m³/s maksimum debinin, kret üzerinde h=2,55 m yük ile akmasını sağlamıştır (Lempérière ve Ouamane, 2003). Novak ve diğerleri (2007), şaft dolusavaklarının debi katsayısının başlık geometrisine bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini ve optimum tasarım için model çalışmalarının gerekli olduğunu belirtmiştir. Dodekagonal su alma hunisi modelinde, akışın tüm drenaj yüzeyinde sakin olduğu gözlenmiştir. Bu durum, poligonal kesitli şaftlarda akış kararlılığının dairesel kesitli şaftlara göre daha iyi olduğunu göstermektedir (Lempérière ve Ouamane, 2003).

6.4.2. Oktagonal ve Tetragonal Kesitli Şaft Dolusavakları (Suriye)

Suriye Arap Cumhuriyeti için dört adet oktagonal (8 kenarlı) ve iki adet tetragonal (4 kenarlı) kesitli şaft dolusavağı tasarlanmıştır (Lempérière ve Ouamane, 2003).

Tablo 18. Suriye Projeleri Şaft Dolusavak Özellikleri

Proje Adı	Kesit Tipi	Kenar Sayısı	Kenar Uzunluğu (m)	Tasarım Debisi (m³/s)	Su Yükü (m)
Daifa HES	Oktagonal	8	5,40	366,7	2,59
Shakra HES	Oktagonal	8	3,00	79,8	1,39
Kshatriya HES	Oktagonal	8	3,94	106,7	1,29
Kadmus HES	Oktagonal	8	2,50	46,3	1,14
Beitlel Hajj HES	Tetragonal	4	8,66	126,6	1,59
Karm Mgazel HES	Tetragonal	4	7,70	64,6	1,12

Not: Lempérière ve Ouamane (2003) esas alınarak hazırlanmıştır.

Poligonal kesitli şaft dolusavaklarının dairesel kesitli olanlara göre avantajları şunlardır (Lempérière ve Ouamane, 2003):

İnşaat teknolojisinin basitleşmesi: Düz kalıp levhaları kullanılabilmektedir. Bu durum, özellikle gelişmekte olan ülkelerde inşaat maliyetlerini önemli ölçüde azaltmaktadır.

Vakum oluşumunun azalması: Eliptik drenaj yüzeyi sayesinde, akış ayrılması ve vakum oluşumu minimize edilmektedir.

Debi katsayısının artması: Poligonal kesitler, dairesel kesitlere göre daha yüksek debi katsayısı sağlamaktadır.

Kavitasyon erozyonunun azalması: Daha pürüzsüz yüzey geçişleri sayesinde kavitasyon riski azalmaktadır.

Kılıç (2021), piyano tuşu yan savaklar üzerinde yaptığı çalışmada, poligonal ve dairesel kesitler arasındaki performans farklarını değerlendirmiş ve poligonal kesitlerin belirli koşullar altında daha avantajlı olduğunu rapor etmiştir. Lempérière ve Ouamane (2003), poligonal kesitli şaft dolusavaklarının özellikle orta ve düşük debi koşullarında dairesel kesitli şaftlara göre daha iyi performans gösterdiğini belirtmiştir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, farklı dolusavak tiplerinde (şaft, ogee, labirent ve şaft dolusavakları) deşarj kapasitesinin belirlenmesinde kullanılan nümerik yöntemler kapsamlı bir şekilde incelenmiş, gerçek vaka çalışmaları üzerinden nümerik modellerin deneysel verilerle karşılaştırmalı analizleri derlenerek sunulmuştur. Elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

Tablo 19. Nümerik model hata oranları karşılaştırması

Parametre	Hata Oranı (%)	Dolusavak Türü	Yazılım
Çıkış debisi	6.4	Şaft	Flow-3D
Kret su derinliği	6.7	Şaft	Flow-3D
Ortalama akış hızı	7.0	Şaft	Flow-3D
Hidrostatik basınç	8.4	Şaft	Flow-3D
Su yüzey profili (maks.)	21.7 mm	Ogee	Fluent

7.1. Nümerik Modelleme Metodolojisine İlişkin Sonuçlar

Türbülans Modeli Seçimi: RNG k-ε türbülans modeli, dolusavak akışlarının nümerik modellenmesinde standart k-ε ve k-ω modellerine göre daha doğru sonuçlar vermektedir. Yakhot ve Orszag (1986) tarafından geliştirilen bu model, hızlı gerinimli akışlar ve şaft dolusavağı gibi büyük geometrik değişimlere sahip yüzeylerdeki akışlar için özellikle uygundur (Chanson, 2004). Wilcox (2006), RNG k-ε modelinin akış ayrılması ve yeniden birleşme bölgelerinde standart k-ε modeline göre daha başarılı olduğunu vurgulamıştır.

Ağ Yapısı Optimizasyonu: Nümerik model doğruluğu için ağ yapısının optimizasyonu kritik öneme sahiptir. Çok bloklu ağ yapısı kullanımı ve FAVOR yöntemi, özellikle karmaşık geometrili dolusavak modellerinde hesaplama hassasiyetini artırmaktadır (Chanson, 2004). Versteeg ve Malalasekera (2007), ağ bağımsızlığı çalışmasının nümerik model güvenilirliği için zorunlu olduğunu ve optimum ağ yapısının çözüm doğruluğu ile hesaplama maliyeti arasındaki dengeden elde edildiğini belirtmiştir.

Serbest Yüzey Takibi: VOF yöntemi, dolusavak akışlarının serbest yüzey profilinin belirlenmesinde başarılı sonuçlar vermektedir. α=0,5 değeri, su yüzey profilinin belirlenmesinde referans olarak kullanılmaktadır (Chanson, 2004).

OpenFOAM yazılımında bulunan interFoam çözücüsü de VOF yöntemini kullanarak iki fazlı (su-hava) akışların modellenmesinde başarılı sonuçlar sunmaktadır (Versteeg ve Malalasekera, 2007).

Yazılım Seçimi ve Karşılaştırması: Dolusavak modellemesinde kullanılan yazılımlar arasında seçim, problem tipine ve mevcut kaynaklara bağlı olarak değişmektedir.

Flow-3D: Şaft dolusavaklarının üç boyutlu simülasyonu için uygun olup, FAVOR yöntemi sayesinde karmaşık geometrilerin modellenmesinde avantaj sağlamaktadır (Chanson, 2004).

ANSYS Fluent: Ogee dolusavaklarının iki ve üç boyutlu simülasyonu için yaygın olarak kullanılmakta olup, geniş türbülans modeli yelpazesi sunmaktadır (Chanson, 2004).

OpenFOAM: Açık kaynak kodlu yapısı sayesinde özelleştirilebilirlik ve lisans maliyeti avantajı sunmaktadır. interFoam çözücüsü ile VOF yöntemini kullanarak serbest yüzey akışlarını modelleyebilmekte ve RNG k-ε, k-ε, k-ω gibi çeşitli türbülans modellerini desteklemektedir (Versteeg ve Malalasekera, 2007). Özellikle akademik araştırmalarda ve yeni model geliştirme çalışmalarında tercih edilmektedir.

Her üç yazılım da RNG k-ε türbülans modelini başarıyla kullanabilmektedir.

7.2. Dolusavak Performansına İlişkin Sonuçlar

Şaft Dolusavakları: Şaft dolusavaklarında akış üç farklı modda kontrol edilmektedir: kret kontrolü, orifis kontrolü ve boru (tam akış) kontrolü. Düşey şaft tamamen dolduğunda, dolusavak 1240 m^3/s debi için büküm sonunda tamamen sönümlenmektedir (Chanson, 2004). Novak ve diğerleri (2007), şaft dolusavaklarının tasarımında bu kontrol modlarının dikkate alınmasının güvenli işletme için kritik olduğunu belirtmiştir.

Ogee Dolusavaklarında Ters Eğrilik: Ters eğrilik yarıçapının artmasıyla maksimum basınç önemli ölçüde azalmaktadır. r/Hd=2,5 değerinde basınç %2,46 oranında azalmaktadır (Chanson, 2004). Ancak, eğrilik yarıçapının artması inşaat maliyetlerini de artırdığından, ekonomik optimizasyon yapılmalıdır. Hager (2010), ogee dolusavaklarında basınç dağılımının kavitasyon riskinin değerlendirilmesinde kritik bir parametre olduğunu vurgulamıştır.

Labirent Dolusavaklar: Trapez labirent dolusavaklar, dairesel labirent dolusavaklardan daha yüksek hidrolik verime sahiptir (Bilhan ve diğerleri, 2018). Nap ayırıcı kullanımı, debi katsayısını yan duvar açısına bağlı olarak %0,5 - %3,8 aralığında azaltmaktadır. Lempérière ve Ouamane (2003), labirent savakların lineer savaklara göre aynı kret uzunluğunda daha yüksek debi kapasitesi sağladığını belirtmiştir.

Şaft Dolusavakları: Poligonal kesitli şaft dolusavakları (dodekagonal, oktagonal, tetragonal), dairesel kesitli olanlara göre inşaat kolaylığı ve hidrolik performans açısından avantaj sağlamaktadır. Eliptik drenaj yüzeyi kullanımı, debi katsayısını artırmakta ve vakum oluşumunu azaltmaktadır (Lempérière ve Ouamane, 2003). Kılıç (2021), piyano tuşu yan savaklar üzerinde yaptığı çalışmada, poligonal kesitlerin belirli koşullar altında daha avantajlı olduğunu rapor etmiştir.

Deneysel Doğrulama: Nümerik modellerin deneysel verilerle doğrulaması, güvenilir sonuçlar elde etmek için zorunludur. Haraz Barajı örneğinde, nümerik modelin ortalama bağıl hatası %6,4 - %8,4 aralığında olup, kabul edilebilir sınırlar içerisindedir (Chanson, 2004). Emiroğlu ve İkincioğulları (2016), yan savakların deşarj kapasitesinin belirlenmesinde deneysel ve nümerik yöntemlerin birlikte kullanılmasının doğruluğu artırdığını belirtmiştir.

Model Doğrulama: Nümerik modellerin deneysel verilerle kalibrasyonu ve doğrulaması, güvenilir sonuçlar elde etmek için zorunludur. Hata oranlarının %10'un altında tutulması, mühendislik uygulamaları için kabul edilebilir bir sınırdır (Versteeg ve Malalasekera, 2007). Birden fazla istatistiksel hatanın (ortalama mutlak hata, karekök ortalama hata vb.) kullanılması, model performansının daha kapsamlı değerlendirilmesini sağlamaktadır.

Konuyla İlgili Bazı Öneriler:

Nap ayırıcı'ların belirli bir yükseklik ve genişlikteki savak için özgül aralığının belirlenmesi, gelecek araştırmalar için değerli bir odak noktası olabilir.

Akış derinliğinin nap genişliğine oranının (en-boy oranı) nap titreşimine etkisinin çalışmalarda daha detaylı incelenmesi gerekmektedir.

OpenFOAM gibi açık kaynak kodlu yazılımların dolusavak modellemesinde kullanımının yaygınlaştırılması, özelleştirilebilir çözümler geliştirilmesine olanak tanıyacabilir.

Farklı türbülans modellerinin (LES, DES gibi) dolusavak akışlarındaki performansının karşılaştırmalı olarak incelenmesi önerilmektedir.

Poligonal kesitli şaft dolusavaklarının farklı kenar sayıları için optimum geometrinin belirlenmesi amacıyla parametrik çalışmalar yapılmalıdır.

Yazılım seçiminde aşağıdaki kriterler dikkate alınabilir:

Flow-3D: Şaft dolusavakları gibi karmaşık geometrili yapıların üç boyutlu simülasyonu için tercih edilmelidir. FAVOR yöntemi, karmaşık geometrilerin modellenmesinde avantaj sağlamaktadır.

ANSYS Fluent: Ogee dolusavaklarının iki ve üç boyutlu simülasyonu için uygun olup, geniş türbülans modeli yelpazesi ve güçlü ağ oluşturma araçları sunmaktadır.

OpenFOAM: Akademik araştırmalar, yeni model geliştirme çalışmaları ve bütçe kısıtı olan projeler için idealdir. Açık kaynak yapısı sayesinde özelleştirilebilirlik sunmakta ve paralel hesaplama desteği ile büyük ölçekli simülasyonlara imkan tanımaktadır.

Dolusavak tasarımında, hidrolik performans ve inşaat maliyeti arasında denge kurulmalıdır. Poligonal kesitli şaft dolusavakları, bu dengeyi sağlamada umut verici bir yaklaşım sunmaktadır. Ayrıca, farklı dolusavak tiplerinin (ogee, labirent, şaft, piyano tuşu) avantaj ve dezavantajları proje özelinde değerlendirilmeli ve en uygun çözüm seçilmelidir. Hidrolik yapıların tasarımında hidrolik performans, inşaat maliyeti ve işletme güvenliğinin birlikte değerlendirilmesi önemlidir.

Yazarlar olarak, bu derleme çalışmasının konuyla ilgili literatüre ve gelecek çalışmalara katkı sunmasını temenni ediyoruz.

8. KAYNAKÇA

Bilhan, O., Aydin, M.C., Emiroglu, M.E., Miller, C. J. (2018). Experimental and CFD analysis of circular labyrinth weirs. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 144 (6).

Chanson, H. (2004). Hydraulics of open channel flow (2. bs.). Butterworth-Heinemann.

Crookston, B. M. ve Tullis, B. P. (2013). Hydraulic design and analysis of labyrinth weirs. I: Discharge relationships. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 139 (5), 363-370.

Emami, S.M., Shafai Bejestan, M., Khodashenas, S.R. (2012). Investigation of hydraulic performance of morning glory spillway using physical model. World Applied Sciences Journal, 19 (6), 831-836.

Emiroglu, M.E., Ikinciogullari, E. (2016). Determination of discharge capacity of rectangular side weirs using Schmidt approach. Flow Measurement and Instrumentation, *50*, 158-168.

Falvey, H. T. (1980). Air-water flow in hydraulic structures (Engineering Monograph No. 41). United States Bureau of Reclamation.

Hager, W.H. (2010). Wastewater hydraulics: Theory and practice (2. bs.). Springer.

Johnson, M.C. (1995). Discharge coefficient analysis for flat-topped and sharp-crested weirs. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, *121* (6), 399-404.

Khatsuria, R. M. (2005). Hydraulics of spillways and energy dissipators. Marcel Dekker.

Kılıç, Z. (2021). Piyano tuşu yan savakların hidrolik karakteristiklerinin sayısal ve deneysel analizi. Doktora tezi, Fırat Üniversitesi.

Lempérière, F. ve Ouamane, A. (2003). The piano keys weir: A new cost-effective solution for spillways. Hydropower & Dams, 10 (5), 144-149.

Novak, P., Moffat, A.I.B., Nalluri, C., Narayanan, R. (2007). Hydraulic structures (4. bs.). Taylor & Francis.

Tullis, J.P., Amanian, N. ve Waldron, D. (1995). Design of labyrinth spillways. Journal of Hydraulic Engineering, 121 (3), 247-255.

United States Army Corps of Engineers, USACE. (1990). Hydraulic design of spillways (Engineer Manual 1110-2-1603). Washington

United States Bureau of Reclamation, USBR. (1987). Design of small dams (3. bs.)USBR.

Versteeg, H. K. ve Malalasekera, W. (2007). An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method. Pearson Education.

Wilcox, D. C. (2006). Turbulence modeling for *CFD* (3. bs.). DCW Industries.

Yakhot, V. ve Orszag, S. A. (1986). Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory. Journal of Scientific Computing, 1 (1), 3-51.

BÖLÜM 2

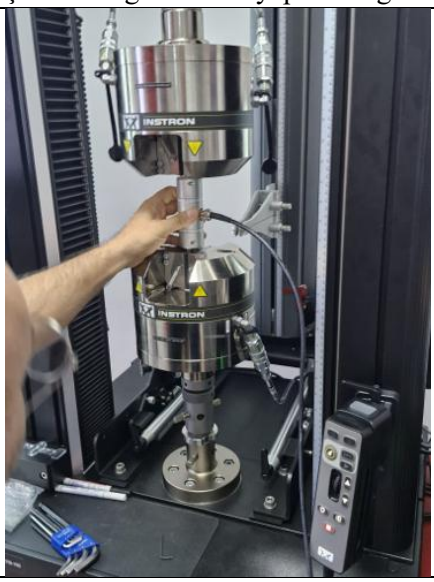
Malzeme Test Makinalarının Kuvvet Kalibrasyonu Ve Akreditasyonu

Bülent Aydemir[1]

[1] Prof. Dr., Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Müh. Böl., DÜBİT Laboratuvarı, Düzce, Türkiye, ORCID: 0000-0001-6848-2681

1. GİRİŞ

Doğru bir malzeme testi gerçekleştirebilmek için doğru makinaya ihtiyacınız vardır. Malzeme test makinasının doğru olarak çalıştığını kalibrasyon ile belgelendirebilirsiniz. Tek eksenli statik malzeme test makinalarının kuvvet kalibrasyonu ISO 7500-1 ve ASTM E4 standartlarına göre yapılmaktadır. Bu kalibrasyonu gerçekleştirebilmek için ISO 376 ve ASTM E74 standardına uygun olarak kalibre edilmiş referans sensörün malzeme test makinasına numune gibi şekil 1 de gösterildiği şekilde bağlantısının yapılması gereklidir.



Şekil 1. Malzeme test makinasına kuvvet ölçme cihazının bağlanması

Bağlantısı yapılan referans kuvvet ölçme cihazından ve malzeme test makinasının kuvvet göstergesinden uygun kuvvet adımlarında veriler toplanır. Elde edilen verilerden standartlarda tanımlanan hata değerleri hesaplanır ve kalibrasyon sertifikaları düzenlenir. Her iki standart içinde durum aynı şekilde gerçekleştirilir. Ancak ISO 7500-1 ile ASTM E4 standartları arasında bazı farklılıklar vardır. Bu farklılıklar aşağıda detaylı bir şekilde verilmiştir.

Malzeme test makinası kuvvet ölçme sistemi için kalibrasyonu yaptırdığınızda her iki standarda uygun olarak kalibrasyon yapılabilir. Ancak bu farklılıkları iyi bilmesi durumda daha doğru bir değerlendirme yapılması mümkün olacaktır. Bu çalışma kuvvet kalibrasyonları arasındaki farklılıkların bilinmesi ve sonuçların değerlendirilmesinin doğru olarak yapılabilmesi amacıyla hazırlanmıştır.

2. ISO 7500-1 İLE ASTM E4 STANDARTLARI ARASINDAKİ FARKLILIKLAR

Kuvvet kalibrasyon standartları, bir malzeme test makinesinin doğru ve tekrarlanabilir sonuçlar üretebilme yeteneğini değerlendirmek için bir çerçeve yöntem tanımlar. Bu sayede kalibrasyon işlemini yapabilen laboratuvarlar için aynı yöntemin uygulanmasını sağlarken, müşteriler açısında da kalibrasyondan beklentileri benzer bir şekilde tanımlamayı sağlar.

Pratikte kalibrasyon sadece teknik bir adım değil, uyumluluk, izlenebilirlik ve verilere küresel güven için bir gerekliliktir. Kuvvet kalibrasyonu alanında esas alınan standartlar ISO 7500-1 ve ASTM E4'tür. Her biri, geliştirildikleri ortamları ve beklentileri yansıtan kendi yöntemini, sınıflandırma sistemini ve test yaklaşımını sunar. Aşağıdaki bölümlerde her bir standart ayrıntılı olarak ele alınarak farklılıkları özetlenmiştir.

2.1. Kapsam

ISO 7500-1:2018 standardı, metalik malzemeler üzerinde çekme ve/veya sıbasma testleri için kullanılan statik tek eksenli test makinaları için geçerlidir. Tek eksende kuvvet uygulayan makinalar için geçerlidir ve dinamik veya yüksek hızlı test uygulamaları için tasarlanmamıştır.

ASTM E4, çekme, basma veya her ikisinde de kullanılan test makinalarında kuvvet ölçme sistemlerinin kalibrasyonu ve doğrulanması için geçerlidir. Test makinaları için eksiksiz bir satın alma şartnamesi olması amaçlanmamıştır, Esas hedef kuvvet ölçümlerinin doğruluğunu doğrulamak olduğu bildirilmiştir. Standart, kuvvet göstergesine sahip olup olmadıklarına bakılmaksızın, statik ve yarı statik test makineleri için geçerlidir.

2.2. Çevresel Şartlar

ISO 7500-1 standardına göre, kalibrasyon 10 °C ile 35 °C arasında bir sıcaklıkta yapılır. Kuvvet ölçme cihazının sıcaklığı kalibrasyon işlemi sırasında en fazla ± 2 °C aralığında değişim gösterebilir.

ASTM E4 standardına göre ise doğrulama işlemi sırasında, kalibre edilmiş bir termometreyi cihaza mümkün olduğunca yakına yerleştirerek, kuvvet ölçüm cihazlarının sıcaklığını ± 1 °C [± 2 °F] içinde değişim gösterebileceği belirtilmiştir.

2.3. İzlenebilirlik ve referans cihaz

ISO 7500-1 standardı SI birimlerine izlenebilirliği vurgular. Kullanılan kuvvet ölçme cihazlarının ISO 376 gerekliliklerine uygun olmalı ve cihazın sınıfı, test makinesinin kalibre edileceği sınıfa eşit veya ondan daha iyi olması gerektiğini tanımlar.

ASTM E4 standardı ise SI izlenebilirliğine de önem verir ancak ölçüm belirsizliği dikkate alındığında daha fazla birleşik sapmaya izin verir. Standart, kuvvet ölçüm hatasının, ölçüm belirsizliği ile birlikte, gerçek kuvvetten ±%1,0'dan fazla bir sapmaya neden olabileceğini belirtir. Ayrıca kullanılan

kuvvet ölçme cihazlarının ASTM E74 gerekliliklerine uygun olmalı ve cihazın sınıfının A veya AA sınıfı olması gerektiği tanımlanmıştır.

2.4. Kalibrasyon İşlemi

ISO 7500-1 standardına göre kalibrasyon işlemi öncelikle cihazın genel kontrolü ile başlar. Kalibrasyondan önce, test makinasının düzgün çalışır durumda olduğundan emin olmak için kapsamlı bir kontrol yapılması gerekmektedir. Kontrol işlemi, malzeme test makinasının aşınma, kusurlar ve performansı etkileyebilecek çevresel faktörlerin kontrol edilmesini içerir. Kalibrasyonu yapılacak cihazın düzgün bir şekilde çalışıyor ve herhangi bir problemi olmaması durumunda kalibrasyona başlanması tarif edilir.

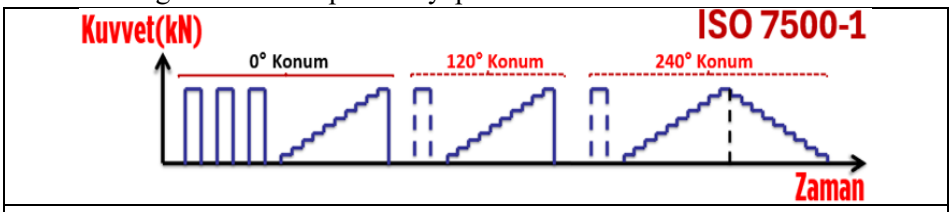
Referans kuvvet ölçme cihazı tek eksenli statik malzeme test makinasına uygun bağlantı aparatlar kullanılarak yerleştirilir. Çekme veya basma yönlü kuvvet uygulamasına göre referans kuvvet ölçme cihazı ile malzeme test makinasının bağlantısı için ISO 376 standardının Ek A kısmında verilen uygun aparatın kullanılması gereklidir. Bağlantı aparatları kuvvetin aynı eksende uygulanması için oldukça önemli bir yapıdadır. Eğer uygun aparat tercih edilmezse kuvvet ekseninde oluşabilecek herhangi bir sapma farklı hata değerlerine sebep olacaktır.

Uygun bağlantı yapıldıktan sonra malzeme test makinası kullanılarak referans kuvvet ölçme cihazına kalibrasyonda istenen maksimum kuvvet değerine kadar ön yükleme uygulanır. Daha sonra yük kaldırılır ve bu işlem üç defa daha tekrarlanır. Ön yükleme olarak adlandırılan bu işlemde, maksimum kuvvet değerine yükleme yapmadan önce ve sonra göstergedeki sıfır değeri ve maksimum kuvvet değeri her seferinde okunup kaydedilebilir. Ancak bu değerler herhangi bir hata hesaplama değeri için kullanılmaz. Bu sebepten çoğu kalibrasyon yapan laboratuvar ön yükleme değerleri kaydetmezler.

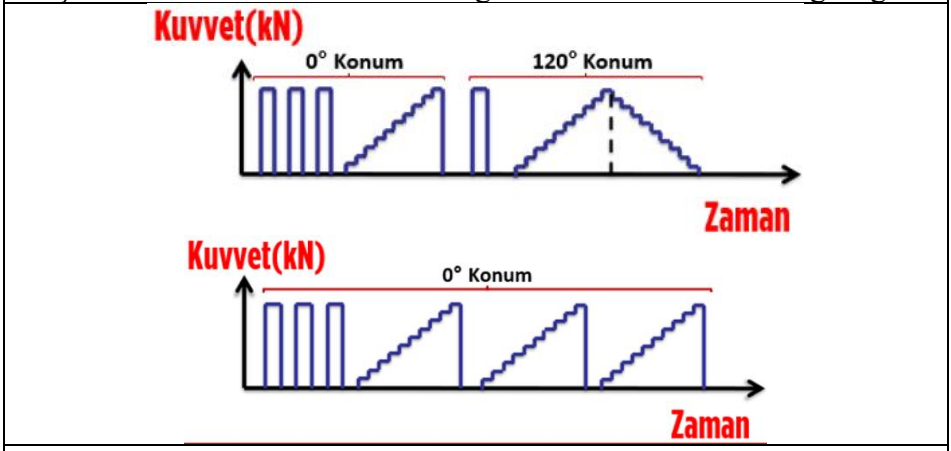
Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet doğrulama kalibrasyonu için uygulanacak kuvvet değerleri artan kuvvet adımları biçiminde 3 seri şeklinde gerçekleştirilir. Her bir serideki kuvvet basamakları, makinanın belirlenen maksimum kuvvet değerinin % 20 ile % 100 arasında en az 5 eşit kuvvet adımına uygulanabilir. Genellikle kuvvet kalibrasyon laboratuvarları 10 eşit adım olacak şekilde kuvvet değerleri belirleyerek kalibrasyonlarını gerçekleştirdiklerini görebilirsiniz. Bu durum standardının gereklilikleri sağladığı için uygun olarak değerlendirilir. Kalibrasyon % 20 kapasitenin altındaki değerlerde yapılacak ise, cihaz kapasitesinin % 10, % 7, % 4, % 2, % 1, % 0,7, % 0,4, % 0,2, % 0,1'indeki kuvvet adımlarında ölçümlerin yapılabileceği belirtilir. Her bir seri arasında referans kuvvet dönüştürücü 120° açı ile döndürülebilir. Her döndürmeden sonra 1 adet ön yükleme uygulanması da gereklidir. Ancak referans kuvvet dönüştürücünün döndürülmesi zorunlu olmadığı için pek çok kalibrasyon laboratuvarı döndürmeksizin aynı konumda 3 seri ölçüm gerçekleştirir. Ayrıca, gerekli olduğu durumlarda veya müşteri tersinebilirlik ölçümü talep ediyorsa ilave bir artan azalan ölçüm serisi uygulanabilir. Tek eksenli statik malzeme test makinasının referans kuvvet ölçme cihazına her kuvvet adımında referans kuvvet

dönüştürücüsüne bağlı gösterge elemanının kuvvet değeri (F) ve malzeme test makinasının göstergesinden okunan kuvvet değeri (Fi) aynı anda okunup kaydedilir. Her bir ölçüm adımı için, göstergelerden takip edilen ölçüm değerleri, aynı sürelerde alınır. Her ölçüm serisi başlangıcında göstergelerden okunan sıfır değerleri kuvvet kaldırıldıktan en az 30 saniye sonrasında iki göstergeden de aynı anda kaydedilir. Sıfır değerleri her seri bitiminde kaydedilir. Şekil 2'de, örnek olarak ISO 7500-1 standardına göre tek eksenli statik malzeme test makinalarının kuvvet kalibrasyonunda uygulanan kuvvet- zaman grafiği gösterilmiştir.

Tüm veriler alındıktan sonra kalibrasyon işlemindeki ölçümler tamamlanmış olur. Sonra elde edilen verilerden ISO 7500-1 standardında tanımlanan hata ve belirsizlik değerlerinin hesaplaması yapılır.



Şekil 2. ISO 7500-1 standardına göre örnek kuvvet-zaman grafiği



Şekil 3. ASTM E4 standardına göre örnek kuvvet-zaman grafiği

ASTM E4 standardına göre doğrulama işleminde öncelikle hangi referans cihazın kullanılacağı belirlenmesi gerekir ASTM E4 standardına göre 3 farklı yöntem ile kuvvet kalibrasyonu veya doğrulaması yapılabilir. Bunlar:

Metod A, Standart ağırlıklarla doğrulama: Standart ağırlıkların, mümkün olan durumlarda test makinasının kuvvet mekanizmasına doğrudan uygulanması ile yapılan en doğru yöntemdir. Standart ağırlıklar aşağı doğru bir kuvvetle çalıştırılmak üzere tasarlandığında yöntemin sınırlamaları şunlardır: (1) küçük kuvvet değerlerinde doğrulama yapılabilmesi, (2) büyük miktarda standart ağırlıkların taşınmasının gerekliliği ve (3) yatay test makinaları veya dikey test makinalarında kuvvet sistemleri sebebiyle kullanılamamalarıdır.

Metod B, Eş kollu terazi ve standart ağırlıklarla doğrulama: İkinci doğrulama yöntemi, kuvvetin eş kollu terazi ve standart ağırlıklar kullanılarak ölçülmesini içerir. Bu yöntem, yukarıdaki yönteme göre daha küçük bir kuvvet aralığı ile sınırlıdır. Genellikle kuvvetin bir iç kaldıraç sistemi yoluyla uygulandığı belirli sertlik test makinası tiplerinde uygulanabilir.

Metod C, Kuvvet ölçüm cihazı ile doğrulama: Üçüncü doğrulama yöntemi, bir kuvvet ölçme cihazı, ölçme halkası, çekme veya basma çubuğu veya başka prensipli bir kuvvet ölçme cihazının kuvvet altında elastik şekil değişimi ile test makinasının sapmasının ölçülmesini içerir. Yaygın olarak kullanılan yöntemdir.

ASTM E4 kuvvet doğrulaması, seçilen kuvvet aralıklarında yer alan kuvvetlerin en az iki seri olarak uygulanmasını tanımlar. Ayrıca, test makinasının kuvvet gösterge sisteminde ayarlama yapılırsa, ayarlama sonrası alınan iki seri ölçümler yeni doğrulama raporunda verilmesi gerektiğini ifade eder.

Doğrulanacak test makinasının onaylanmış kuvvet aralığının alt ve üst sınırları belirlenir. Onaylanmış kuvvet aralığı, test makinası kuvvet göstergesinin çözünürlüğünün 200 katının altındaki kuvvetleri içermemelidir.

Doğrulanmış kuvvet aralığının alt sınırı üst sınırın 1/10 na eşit olabilir. Eğer onda birinden büyük ise 5 veya daha fazla doğrulama kuvvet adımı seçilmelidir. İki doğrulama kuvvet adımı arasındaki fark, doğrulanmış kuvvet aralığının üst ve alt limitleri arasındaki farkın 1/20 daha büyük veya buna eşit olabilir. Ya da 1/3 den daha az veya buna eşit olacak şekilde olabilir. Eğer iki farklı kuvvet aralığında doğrulama yapılacaksa, bir doğrulanmış kuvvet aralığının alt limiti diğer doğrulanmış başka bir kuvvet aralığının üst limiti olmalıdır.

Doğrulama kuvveti aralığının alt sınırı, üst sınırın 1/10 kadar ise, doğrulama kuvvetleri aşağıdaki gibi seçilmelidir:

- Doğrulanmış kuvvet aralığının alt sınırından başlayarak, her biri maksimum kuvvetin 1/10 olacak şekilde 10 eşit adım oluşturulur. Ancak en yüksek kuvvet basamağı tam olarak 1/10 de olmayabilir.
- 5 veya daha fazla farklı doğrulama kuvveti adımları da seçilebilir. Kuvvet adımları için kuvvet oranının 1:1, 2:1, 4:1, 7:1, 10:1 veya 1:1, 2,5:1, 5:1, 7,5:1, 10:1 olması önerilir
- Eğer en yüksek 1/10 tam olarak onda bire eşit değilse, olası oranlarda doğrulama kuvvetleri seçilir ve doğrulanan kuvvet aralığının üst sınırına eklenir. İki bitişik doğrulama kuvveti arasındaki fark, üst limitin 1/3 den büyükse, ilave bir doğrulama kuvveti eklenmelidir. Daha iyi anlaşılması için aşağıdaki örnek incelenmelidir. Örnek: Test makinasının maksimum kapasitesi 5000 N ve cihazın çözünürlüğü ise 0,0472 N olsun. Bu durumda en küçük veya alt sınır doğrulama kuvveti 9,44 N (0,0472 x 200 = 9,44 N) olacaktır. Bu durumda doğrulama kuvvet aralığı 9,44 N, 94,4 N ve 944 N olabilir ama bunun yerine 10 N, 100 N ve 1000 N seçilir. Uygun doğrulama kuvvetleri olarak 10, 20, 40, 70, 100, 200, 400, 700, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 olarak belirlenebilir. 2000 ve 4000 arasındaki fark 5000'in üçte birinden fazla olduğu için 3000 N adımı eklenmiştir. Alternatif

kuvvet dağılımı kullanılırsa, seçilen doğrulama kuvvetleri 10, 25, 50, 75, 100, 250, 500 750, 1000, 2500, 3750, 5000 olabilir.

Seçilen tüm doğrulama kuvvetleri, doğrulama prosedürü sırasında 2 seri uygulanacaktır. İkinci seride uygulanan kuvvetler, ilk seridekiler ile yaklaşık olarak aynı olacaktır.

Bir seride maksimum kuvvet kaldırıldıktan yaklaşık 30 s sonra, sıfıra dönüş değeri kaydedilmelidir. Bu değer, çözünürlük, ya uygulanan maksimum kuvvetin % 0,1'i veya ölçümdeki en düşük doğrulanmış kuvvetin % 1'i (hangisi daha büyükse) ± 0,0 olmalıdır.

Doğrulama yöntemleri için ASTM E4 standardında aşağıda verilen farklı metotlar tanımlanmıştır.

Metod A, Standart Ağırlıklarla Doğrulama: Test makinasının kuvvet platformuna veya numune yerine kuvvet ölçüm sisteminde askıya alınan kefe veya diğer bağlantı aparatları ile uygun tasarımlı, temiz ve ayarlı standart metal ağırlıklar yerleştirilerek yapılır. Ağırlıklar % 0,1 doğruluk ve 5 yıllık periyotlarla kalibre edilmiş olmalıdır. Ağırlıklar artan şekilde veya hem artan hem de azalan şekilde sisteme yerleştirilir ve çıkartılırlar. ASTM E4 Bölüm 8'e göre yerçekimi ve havanın kaldırma kuvvetine göre düzeltilmiş kuvvetler kullanılarak alınan veriler kaydedilir.

Metod B., Eş Kollu Terazi ve Standart Ağırlıklarla Sertlik Test Cihazlarının Doğrulanması: Teraziyi, kalibre edilen test makinasının batıcı ucuna, eş kollu terazinin bir tablası üzerinde ortalanmış dayanacak şekilde konumlandırılır. Batıcı uç normal olarak hareket halindeyken bu kısım denge konumundadır. Batıcı ucun yükünü dengelemek için karşı tablaya gerekliliklere uygun standart ağırlıklar yerleştirilerek uygulanır. Sertlik test makinası batıcı ucunun izin verilen hareketi genellikle çok küçük olduğundan, terazinin salınmamasına dikkat edilmelidir.

Kesirli ağırlık kombinasyonlar kullanarak, hem ardışık 10 adet ölçümün her biri sırasında test makinası batıcı uç kuvveti tarafından kaldırılabilen ölü ağırlık kuvvetinin maksimum değeri, hem de 10 adet herhangi biri sırasında kaldırılamayan minimum kuvvet değeri ardışık denemeler ile ölçülür. Batıcı uç kuvvetinin doğru değeri bu 2 değerin ortalaması olarak alınır. 2 değer arasındaki fark ortalama değerin % 0,5'ini geçmemelidir.

Metod C, Kuvvet Ölçüm Cihazı ile Doğrulama: Bir test makinasını doğrulamak için kuvvet ölçüm cihazı kullanırken, cihazın tepkisinin kararlı olmasını sağlamak için doğrulamadan önce test makinasına yakın veya tercihen test makinası üzerine sıcaklık dengesinin sağlanabilmesi için yeterli bir süre yerleştirilmelidir. Doğrulama sırasında, kalibre edilmiş bir termometreyi cihaza mümkün olduğunca yakına yerleştirerek, kuvvet ölçüm cihazlarının sıcaklığını ± 1 °C [± 2 °F] içinde olduğu sağlanmalıdır.

Doğal bir sıcaklık dengeleme özelliğine sahip olmayan kuvvet ölçüm cihazları, ortam sıcaklığı ile kalibrasyona atıfta bulunulan sıcaklık arasındaki fark

için matematiksel olarak düzeltilmelidir. Sıcaklık düzeltme katsayıları (varsa) kuvvet ölçüm cihazının üreticisi tarafından sağlanmalıdır.

Cihazın doğrulamasına geçildiğinde, kuvvet ölçüm cihazı, test makinasının çenelerinin merkez çizgisine denk gelecek şekilde test makinasına yerleştirilir. Kuvvet ölçme cihazının yükleme aralığı için izin verilen alt kuvvet limiti ve ASTM E74 göre Sınıf A doğrulama değeri dikkate alınmalıdır. Her bir kuvvet ölçüm cihazı sadece kendi Sınıf A kuvvet aralığında kullanılmalıdır.

Ön yükleme amacıyla, test makinasına maksimum doğrulama kuvvetini uygulanır ve sıfır kuvvete dönülür. Bu işlem test makinası göstergesi sıfırlanır ve tekrarlanır. Test makinasının kuvvet göstergesinin sıfır kuvvette dengeyi sağlaması için yeterli süre beklenir ve işlem gerektiği kadar tekrarlanır. Doğrulama işlemi sırasında kuvvet yönü değiştirildiğinde, ön yükleme aynı şekilde tekrar uygulanır.

Kuvvet ölçme cihazlarını doğrulamadaki kullanımında 2 yöntem vardır:

- Kuvvet Takip Yöntemi: Kuvvet ölçme cihazı üzerindeki kuvvet, test makinasının kuvvet göstergesi nominal bir değere ulaşana kadar takip edilir. Kuvvet değeri kuvvet ölçme cihazından okunur.
- Kuvvet Ayarlama Yöntemi: Nominal kuvvet, kuvvet ölçüm cihazında önceden ayarlanmıştır ve kuvvet ölçüm cihazındaki nominal kuvvet değerine ulaşıldığında test makinasının kuvvet göstergesindeki değer okunur.

Uygun kuvvet adımları seçtikten sonra hem test makinası hem de kuvvet ölçüm cihazı için sıfır değerleri okunur ve tüm doğrulama ölçüm kuvvet adımları yavaş bir şekilde uygulanır ve tüm veriler kaydedilir. Şekil 3'te, örnek olarak ASTM E4 standardına göre tek eksenli malzeme test makinalarının kuvvet kalibrasyonunda uygulanan kuvvet-zaman grafiği gösterilmiştir.

2.5. Hata hesaplamaları

ISO 7500-1 standardına göre alınan veriler aşağıda verilen hata değerleri hesaplanarak değerlendirilir.

Bağıl doğruluk hatası (q) aşağıdaki formüllerde de verildiği gibi her bir seri için okunan kuvvetin (Fi) gerçek kuvvetten (F) farkının yüzde cinsinden değeri ile hesaplanır, daha sonra her bir seri için hesaplanan bu değerin aritmetik ortalaması alınarak ölçümün bağıl doğruluk hatası elde edilir.

$$q_1 = \frac{F_{1i} - F_1}{F_1}.100 \quad (1)$$

$$q_2 = \frac{F_{2i} - F_2}{F_2}.100 \quad (2)$$

$$q_3 = \frac{F_{3i} - F_3}{F_3}.100 \quad (3)$$

$$q = \frac{q_1 + q_2 + q_3}{3} \quad (4)$$

Burada,
q : bağıl doğruluk hatası
Fi $_{1,2,3}$: her bir seri için okunan kuvvet değeri, 1,2 ve 3. serileri değerlerindeki
$F_{1,2,3}$: her bir seri için gerçek kuvvet değeri, 1,2 ve 3. serileri değerlerindeki

Bağıl tekrarlanabilirlik hatası, b, bağıl doğruluk hatası kapsamında her bir seri için hesaplanan bağıl doğruluk değerinin (q_1,q_2,q_3) en büyüğü ile en küçüğü arasındaki farktır.

$$b = q_{max} - q_{min} \quad (5)$$

Burada,
b : bağıl tekrarlanabilirlik hatası
q_{max} : Maksimum doğruluk hatası, 1,2 ve 3. serileri değerlerindeki
q_{min} : Minimum doğruluk hatası, 1,2 ve 3. serileri değerlerindeki

Bağıl tersinebilirlik hatası, v, sadece talep edildiği takdirde hesaplanarak sertifikaya ilave edilir. Bağıl tersinebilirlik hatası, doğruluk kontrolünün aynı basamak kuvvetlerde önce artan, sonra azalan kuvvetlerle gerçekleştirilmesiyle hesaplanır. Bu nedenle, makina azalan test kuvvetleriyle de kalibre edilmelidir. Artan ve azalan test kuvvetlerinde elde edilen değerler arasındaki fark, aşağıdaki formül kullanılarak, yüzde cinsinden hesaplanan bağıl tersinebilirlik hatasını elde edilir.

$$v = \frac{F - F'}{\bar{F}} . 100 \quad (6)$$

Burada,
v : bağıl tersinebilirlik hatası,
F : Artan yönlü kalibrasyon gerçek kuvvetini,
F': Azalan yönlü kalibrasyon gerçek kuvvetini,
$\bar{F}$: Artan yönlü kalibrasyon gerçek kuvvetlerinin aritmetik ortalama değerini ifade eder.

Bağıl Sıfır hatası, f_0, kalibrasyondaki her bir seri öncesi malzeme test makinasının gösterge değeri sıfırlanır. Seri tamamlandıktan 30 s sonra malzeme test makinasının göstergesindeki sıfır değeri okunur. Aşağıdaki eşitlik kullanılarak bağıl sıfır hatası yüzde cinsinden hesaplanır.

$$f_0 = \frac{F_{i0}}{F_N} . 100 \quad (7)$$

Burada,
f_0 : Bağıl sıfır hatası,
F_N : Malzeme test makinasının uygulanan serideki maksimum kuvvet değeri,
F_{i0} : Malzeme test makinasının kuvvet kaldırıldıktan sonraki gösterge değerini ifade eder.

Bağıl Çözünürlük hatası, a, kuvvet gösterge elemanın bağıl çözünürlüğü "a", yüzde olarak aşağıdaki formül ile tanımlanır. Bağıl çözünürlük hatası "a", her kalibrasyon noktasında kontrol edilmelidir

$$a = \frac{r}{F_i} . 100 \qquad (8)$$

Burada,
a : Bağıl çözünürlük hatası,
r : Malzeme test makinasının çözünürlük değeri,
F_i : Malzeme test makinasının uygulanan noktadaki kuvvet değerini ifade eder.

ASTM E4 standardına göre alınan veriler aşağıda verilen hata değerleri hesaplanarak değerlendirilir.

Bağıl veya yüzde hata, q, aşağıdaki formüllerde de verildiği gibi her bir seri için okunan kuvvetin (Fi) gerçek kuvvetten (F) farkının yüzde cinsinden değeri ile hesaplanır.

$$q_1 = \frac{F_{1i} - F_1}{F_1} . 100 \qquad (9)$$

$$q_2 = \frac{F_{2i} - F_2}{F_2} . 100 \qquad (10)$$

$$q_3 = \frac{F_{3i} - F_3}{F_3} . 100 \qquad (11)$$

$$q = \frac{q_1 + q_2 + q_3}{3} \qquad (12)$$

Burada,

q : bağıl hata

$Fi_{1,2,3}$: her bir seri için okunan kuvvet değeri, 1,2 ve 3. serileri değerlerindeki

$F_{1,2,3}$: her bir seri için gerçek kuvvet değeri, 1,2 ve 3. serileri değerlerindeki

Bağıl tekrarlanabilirlik hatası, b, bağıl hata kapsamında her bir seri için hesaplanan bağıl doğruluk değerinin (q_1,q_2,q_3) en büyüğü ile en küçüğü arasındaki farktır.

$$b = |q_{max} - q_{min}| \quad (13)$$

Burada,

b : bağıl tekrarlanabilirlik hatası

q_{max} : Maksimum doğruluk hatası, 1,2 ve 3. serileri değerlerindeki

q_{min} : Minimum doğruluk hatası, 1,2 ve 3. serileri değerlerindeki

2.6. Sınıflandırma

ISO 7500-1 standardına göre ölçüm sonuçlarından hesaplanan hata değerlerine göre malzeme test makinasının sınıf değeri verilen sınıflandırma tablosuna göre belirlenir. Aşağıdaki tabloda tek eksenli statik malzeme test makinalarının kuvvet ölçme sistemlerinin sınıflandırılması için müsaade edilen maksimum değerler verilmiştir.

Tablo 1. Malzeme test makinalarının ISO 7500-1'e göre sınıflandırılması

Makinanın Sınıfı	Müsaade Edilen En Yüksek Değer				
	Bağıl Hatalar (%)				
	Gösterge (doğruluk)	Tekrarlanabilirlik (b)	Tersinebilirlik* (v)	Sıfır (f_0)	Çözünürlük (a)
0,5	± 0,5	0,5	± 0,75	±	0,25
1	± 1,0	1,0	± 1,5	±	0,5
2	± 2,0	2,0	± 3,0	±	1,0
3	± 3,0	3,0	± 4,5	±	1,5

* gerekirse, müşteri isterse

Bu sınıflandırma, kalibrasyonda uygulanan maksimum kuvvetin en az % 20'si ile % 100'ü arasındaki ölçüm aralığını kapsamalıdır. Tek eksenli statik malzeme test makinasının sınıflandırılmasında ölçüm sonucu bulunan belirsizlik değerinin sınıfa bir etkisi yoktur. Bu sebepten akredite olan laboratuvarın sertifikalarında malzeme test makinalarının kuvvet kalibrasyonu sonuçlarının değerlendirilmesi basit kabul karar kuralına göre yapılır.

ASTM E4 standardına göre test makinasının ölçüm aralığı içindeki kuvvetlerin yüzde hatası ± % 1.0'ı geçmemelidir. Aynı kuvvete sahip iki seri ölçümleri arasındaki fark yani tekrarlanabilirlik hatası da % 1.0'ı geçmemelidir.

Bir test makinasının doğrulanma raporu, makinanın kabul edildiğini veya reddedildiğini bildirmek yerine, hangi doğrulanmış kuvvetler aralığında kullanılabileceğini ifade eder. Birden fazla kapasite aralığına sahip makinalarda, her birinin doğrulanmış kuvvet aralığı belirtilmelidir. Hiçbir durumda, doğrulanmış kuvvet aralığı, doğrulama testi sırasında uygulanan kuvvet aralığının dışındaki kuvvetleri içerecek şekilde belirtilmez.

ASTM E4 standardına göre ölçümler sonrasında hata değerleri değerlendirilmekte ama bir sınıflandırma yapılmamaktadır. ASTM E4 standardına göre doğrulanan (kalibre edilen) malzeme test makinası kuvvet gösterge sistemleri ± % 1 doğrulukta olması gereklidir. Ayrıca, alınan ölçüm serileri arasındaki tekrarlanabilirlik hatasının, ASTM E4 standardına uygun olabilmesi için ± % 1 'den daha az veya buna eşit olması gereklidir. Bu şartları sağlayan cihazlar için ASTM E4 standardına göre kullanımı uygun olarak değerlendirilir. Test makinalarında, alıcılar / sahipler / kullanıcılar daha büyük veya daha küçük hata sistemlerine ihtiyaç duyabilir veya bunlara izin verebilir. Ancak bu cihazlar yani ± % 1.0'den büyük yüzde hata veya % 1,0'den büyük tekrarlanabilirlik hatasına sahip makinalar ASTM E4 ile uyumlu değildir.

2.7. Kalibrasyon / Doğrulama Periyodu Tavsiyesi

ISO 7500-1 standardına göre 2 kalibrasyon arasındaki süre, test makinasının tipine, bakım standardına, kullanım sıklığına ve test edilen malzeme tipine bağlı olduğu belirtilir. Aksi belirtilmediği taktirde, kalibrasyon 12 ayı geçmeyen sürelerle tekrarlanır. Doğruluğun kontrolü, makina bir yerden bir yere taşınmışsa veya büyük bir bakım veya onarım görmüş ise derhal tekrarlanır.

ASTM E4 standardına göre ise test makinalarının yılda 1 veya gerekirse daha sık doğrulanması tavsiye edilir. Hiçbir durumda, doğrulama arasındaki zaman aralığı 18 ayı geçemez (uzun süreli testin 18 aylık sürenin ötesine geçtiği makineler hariç). Bu gibi durumlarda makina, testin tamamlanmasından sonra doğrulanmalıdır.

2.8. Ölçüm belirsizliği

Her iki standartta malzeme test makinasının kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonunda, genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliğinin hesabı, kapsam faktörünün tahmini istatistiksel dağılımın % 95 güvenilirlik seviyesi için (k=2,0) değerinde alınması ve kalibrasyon sonuçlarının değerlendirilmesi çerçevesinde, hesaplanan bileşik bağıl ölçüm belirsizlik değerinin kapsam faktörü ile çarpımı olarak verilmesi belirtilmektedir.

Malzeme test makinalarının kuvvet kalibrasyonu kapsamındaki belirsizlik hesaplaması, ISO 7500-1 standardının Ek C kısmında ve EURAMET CG-04 dokümanında detaylı olarak açıklanmıştır.

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonunda etkin olan tüm bağıl ölçüm belirsizliği bileşenleri kullanılarak, bileşik bağıl ölçüm belirsizlik değeri (u_c) ve genişletilmiş ölçüm belirsizliği değeri (U) k=2 alınarak aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$u_c = \sqrt{u_{cal}^2 + u_{drift}^2 + u_{temp}^2 + u_{approx}^2 + u_{rep}^2 + u_{res}^2} \qquad (14)$$

$$U = k \, . \, u_c$$

u_{cal} = referans kuvvet ölçme cihazının sertifikasından gelen bağıl belirsizlik bileşeni

u_{drift}= referans kuvvet ölçme cihazının uzun süreli kararlılığından gelen bağıl belirsizlik bileşeni

u_{temp} = referans kuvvet ölçme cihazının sıcaklık kaymasından gelen bağıl belirsizlik bileşeni

u_{approx} = referans kuvvet ölçme cihazının denklem yaklaşımından gelen bağıl belirsizlik bileşeni

u_{rep} = ölçümlerin tekrarlanabilirliğinden gelen bağıl belirsizlik bileşeni

u_{res} = gösterge sisteminin çözünürlüğünden gelen bağıl belirsizlik bileşeni

ASTM E4 standardına göre malzeme test makinalarının kuvvet kalibrasyonu kapsamındaki belirsizlik hesaplaması, ASTM E4 standardının Ek X2 kısmında detaylı olarak açıklanmıştır.

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonunda etkin olan tüm ölçüm belirsizliği bileşenleri kullanılarak, bileşik ölçüm belirsizlik değeri aşağıdaki 15 nolu eşitlik ile hesaplanır. Ancak aşağıdaki şart kontrol edilir. Eğer $u_{rep} < u_{res}$ ise u_{res} değeri hesaba dahil edilir. Diğer durumda $u_{res} = 0$ olarak alınır.

Standart olarak kullanılan cihazın ölçüm belirsizlik değeri (u_{std}) eğer kullanılan referans cihaz kuvvet ölçme cihazı ise yani ASTM E4 metod C göre kalibrasyon yapılırsa aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir. Elde edilen belirsizlik ile cihazın genişletilmiş toplam belirsizliği (U) de aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$u_{rep} \geq u_{res} \rightarrow u_{res} = 0$$

$$u_{std} = \sqrt{u_{cal}^2 + u_{drift}^2 + u_{temp}^2 + u_{approx}^2} \qquad (15)$$

$$u_c = \sqrt{u_{std}^2 + u_{rep}^2 + u_{res}^2} \quad \rightarrow \quad U = k \,.\, u_c \qquad (16)$$

Her iki ölçüm belirsizliği hesaplaması kıyaslandığında ISO 7500-1 standardına göre hesaplanan belirsizlik değeri daha fazla belirsizlik parametresi içerdiği için ve ASTM E4 standardına göre yapılan hesaplamadan genel olarak daha büyük bir değer verecektir. Bu sebepten kalibrasyon yapan akredite laboratuvarlar genellikle ISO 7500-1 standardına uygun olarak ölçüm belirsizlik hesabını kullanırlar. Daha büyük çıkan ölçüm belirsizliği değerini sertifikalarında beyan ederler.

2.9. Sertifikadaki Bilgileri

Kalibrasyon sertifikası, ISO 7500-1 ve ASTM E4 standartlarına göre en az aşağıdaki bilgileri içermelidir:

a) Standarda atıf (ISO 7500-1, ASTM E4),

b) Test makinasının tanıtılması (tip, üretici, üretim yılı, seri no)

c) Makinanın bulunduğu yer (adres),

d) Kullanılan kuvvet ölçme cihazının tipi ve seri no ile kalibrasyon sertifika no ve sertifikanın geçerliliğinin sona erdiği tarih,

e) Kalibrasyonun yapıldığı ortam sıcaklığı,

f) Kalibrasyonun yapıldığı tarih,

g) Kalibrasyon / Doğrulamayı yapan laboratuvarın adı veya işareti, doğrulama yapan kişi(ler), doğrulamadan sorumlu kişinin adı ve imzası

h) Doğrulanan kuvvet gösterge sistemlerini tanımlayan beyan,

i) Doğrulama yönü; basma, çekme veya çekme - basma

j) Test makinasının her bir kuvvet gösterge sisteminin doğrulanmış kuvvet aralığı ve ilgili çözünürlük değerleri,

k) Genel muayene sırasında belirlenen her türlü anormallik,

l) Kullanılan her bir kuvvet ölçme sistemi için, kalibre edilen her bir aralığın sınıfı, talep edildiği takdirde bağıl doğruluk, tekrarlanabilirlik, sıfır ve çözünürlük hatalarının basamak değerleri, ISO 7500-1 için sınıf değeri

m) Değerlendirmenin geçerli olduğu her bir aralığın alt sınırı,

n) Test makinasının gösterge kuvveti ve her bir doğrulama kuvvetindeki her seri için doğrulama cihazındaki kuvvet değeri,

o) Her seriden sonra, her bir kuvvet aralığı için sıfır değeri,

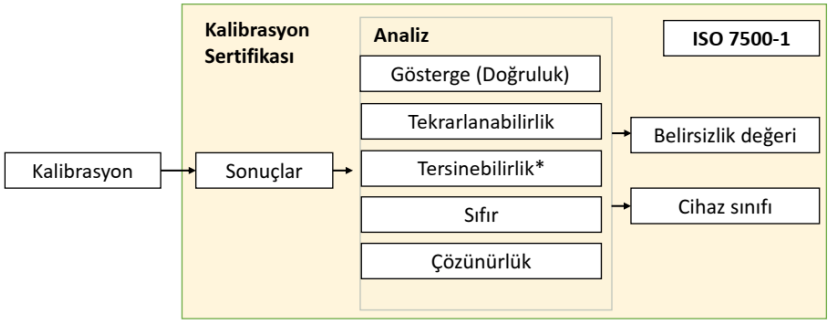
p) ASTM E4'e göre kullanılan doğrulama metodu

q) ASTM E4'e göre doğrulama için kullanılan kuvvet ölçüm cihazlarının sıcaklığı ve hesaplanan kuvvetlerin gerektiğinde sıcaklığının düzeltildiğine dair bir açıklama

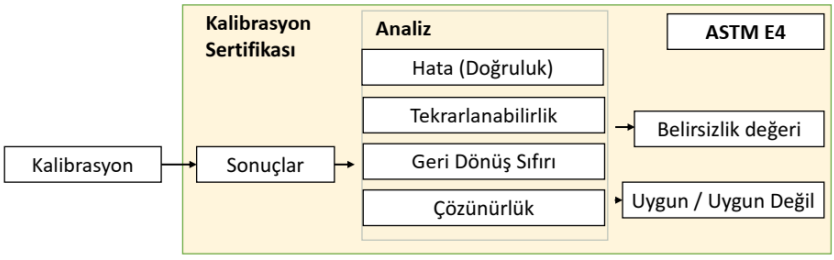
r) İsteğe bağlı olarak veya gerekiyorsa, doğrulamanın ölçüm belirsizliği değeri

s) Doğrulama kurumu tarafından oluşturulan her Rapor ve Sertifika belgesi benzersiz bir şekilde tanımlanmalıdır. Sayfaların raporun ve sertifikanın bir parçası olarak tanınmasını sağlamak için sayfa numaralarını, toplam sayfa sayısını veya belgenin sonunu belirtmek için bir işaret eklenmelidir.

Her iki standart genel gereklilikler olan kalibre edilen cihaz bilgileri, marka model, seri numarası, kalibrasyonun yapıldığı yer, ortam şartları, kalibrasyonun hangi kuvvet yönünde yapıldığı (çekme, basma, yada her iki yönde) gibi temel bilgilerin verilmesi gerektiğini tanımlamıştır. Bu bilgilere ilave olarak ISO 7500-1 standardına göre sertifikada olması gereken parametreler şekil 4'te ve ASTM E4 standardına göre olması gereken parametreler ise Şekil 5 te gösterilmiştir.



Şekil 4. ISO 7500-1 standardına göre kalibrasyon sertifikasında belirtilen verilerim şematik gösterimi



Şekil 5. ASTM E4 standardına göre kalibrasyon sertifikasında belirtilen verilerim şematik gösterimi

ASTM E4 standardına göre doğrulanan (kalibre edilen) malzeme test makinası kuvvet gösterge sistemleri ± % 1 doğrulukta olması gereklidir. Ayrıca, ölçüm alınması sonrasında seriler arasındaki tekrarlanabilirlik hatasının, ASTM E4 standardına uygun olabilmesi için ± % 1 'den daha az veya buna eşit olması gereklidir.

3. ISO 7500-1 İLE ASTM E4 STANDARTLARINDAN AKREDİTASYON

ISO 7500-1 ve ASTM E4 kuvvet kalibrasyon standartları olup bir malzeme test makinesinin doğru ve tekrarlanabilir sonuçlar alınabilmesi için uygun yöntemleri tanımlayan uluslararası kabul görmüş yöntemlerdir. Benzer amaç için olsa bile bazı farklılıkları vardır. Bu standartlardan akredite olmayı düşünen laboratuvarların farklılıkları bilerek işlemlerini gerçekleştirmesi gereklidir. Akreditasyon için önemli olabilecek farklılıklar aşağıda vurgulanmıştır.

ISO 7500-1 standardı, her biri izin verilen bağıl hatalara sahip belirli doğruluk sınıflarını (Sınıf 0,5, 1, 2 ve 3) tanımlar. Örneğin, Sınıf 1, maksimum ±%1,0 bağıl hataya izin verir. Bu sınıflar, kullanıcıların test gereksinimlerine uygun makina seçimine ve ölçüm doğruluğunda tutarlılık sağlar.

ASTM E4 standardı ise sınıflandırma yapmadan test cihazının doğrulanmış aralıkta uygulanan kuvvete göre ±%1 doğrulukta ve ±%1 tekrarlanabilirlikte olması gerektiğini belirtir. Bu yaklaşım, cihazları belirli sınıflara ayırmadan genel bir doğruluk gereksinimi tanımlar.

ISO 7500-1, SI birimlerine izlenebilirliğe odaklanır ve kullanılan referans kuvvet ölçme cihazlarının ISO 376 gerekliliklerine uygun olmasını ve cihazın sınıfı, test makinasının kalibre edileceği sınıfa eşit veya ondan daha iyi olmasını ister.

ASTM E4 ise SI izlenebilirliğine de önem verir ancak ölçüm belirsizliği dikkate alındığında daha fazla birleşik sapmaya izin verir. Standart, kuvvet ölçüm hatasının, ölçüm belirsizliğiyle birleştiğinde, gerçek kuvvetten ±%1,0'dan fazla bir sapmaya neden olabileceğini belirtir.

ISO 7500-1 ve ASTM E4 standartlarının yanında malzeme test makinalarının diğer ölçüm parametrelerinin de kontrolü için aşağıdaki standartlarında bilinmesi akredite olacak laboratuvarlar için önemlidir. İlgili standartlar,

- ASTM E83 / ISO 9513 - Ekstansometre kalibrasyonu
- ASTM E1012 - Eksenellik, Hizalama doğrulaması
- ASTM E18 / E10 / E92 / A956 - Sertlik testi (Rockwell, Brinell, Vickers, Leeb)
- ASTM E2658 - Hız kalibrasyonu
- ASTM E2309 - Hareketli tabla kalibrasyonu

Standardın sınıflandırma sistemi (Sınıf 0.5, 1.0, vb.), özellikle test standartlarının uyumlaştırılmasının önemli olduğu sınır ötesi sözleşmelerde, müşterilerin ve denetçilerin testlerde kullanılan ekipmanın hassasiyet seviyesini anında değerlendirmesine olanak tanır.

ISO 7500-1, Kuzey Amerika dışında birçok Avrupa ve Asya ülkesinde tercih edilen kalibrasyon standardıdır ve genellikle ISO/IEC 17025 gerekliliklerinin bir parçası olarak ulusal akreditasyon kuruluşları tarafından zorunlu kılınmaktadır. Metalik malzemeler üzerinde çekme veya basma testi yapan bir laboratuvarın, izlenebilirliği ve küresel uyumluluğu sağlamak için kuvvet doğrulama prosedürlerini ISO 7500-1'e uygun hale getirmesi beklenir.

ASTM E4, Amerika Birleşik Devletleri'nde birincil standart olmaya devam etmekte olup, A2LA, NVLAP ve NADCAP programları kapsamında akredite edilmiş laboratuvarlar tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle savunma sanayi, inşaat malzemeleri ve plastik testleri gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılmakta ve ASTM tabanlı uyumluluk ekosistemlerine entegre edilmektedir.

Kuvvet kalibrasyonları alanında akredite olmayı planlayan laboratuvarlar özetlenen farklılıkları dikkate alarak aynı referans cihazları kullanarak hem ISO 7500-1 uygun olarak hem de ASTM E4 standardına uygun olarak akredite olabilirler.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Ülkemizde yaygın olarak kullanılmakta olan malzeme test makinalarının kuvvet kalibrasyonları ISO 7500-1 ve ASTM E4 standartlarına göre yapılabilir. Genel olarak, ISO 7500-1 standardı ile ASTM E4 standardı arasındaki farklılıklar ve bunların kalibrasyon sertifikasına etkileri aşağıda kısaca özetlenmiştir.

- ISO 7500-1 göre 3 seri ölçüm alınması gerekli iken, ASTM E4 göre 2 seri ölçüm alınması yeterlidir. Bu durumda ISO 7500-1 göre daha fazla ölçüm alındığı için ASTM E4 standardını kapsadığı bildirilebilir.
- ISO 7500-1 standardında sınıflandırma tablosu vardır. Ölçümler sonucunda cihazın sınıfı belirlenir ve sertifikada belirtilir. ASTM E4 standardında sınıflandırma tablosu yoktur. Standardın tanımlamasına göre uygun ve uygun değil şeklinde ifade edilir.
- ISO 7500-1 göre ölçüm belirsizliği hesabına daha fazla parametreden alınan değerler hesaba katılarak hesaplanır. ASTM E4 göre ise ölçüm belirsizliği hesabına daha az parametre katılmasının yeterli olacağı standartta tanımlanmıştır. Bu durumda ISO 7500-1 göre ölçüm belirsizliği hesabı muhtemelen daha büyük bir değer olduğu için ASTM E4 standardına göre hesaplanacak ölçüm belirsizlik değerini kapsadığı düşünülmelidir.
- ISO 7500-1 standardına göre ve ASTM E4 standardına göre benzer hata değerleri hesaplanır. ASTM E4 standardına göre ölçülen kuvvet değerlerinin yüzde hatası ± % 1.0'ı geçmemelidir. Aynı kuvvete sahip iki seri ölçümleri arasındaki fark yani tekrarlanabilirlik hatası da % 1.0'ı geçmemelidir. ISO 7500-1 standardında da gösterge hatası ve tekrarlanabilirlik hatası hesaplanır. Eğer hata değerleri % 1.0 geçmiyorsa sınıf 1 olarak cihaz sınıflandırılır. Bu durum ISO 7500-1 standardına göre sınıf 1 olan cihazların muhtemelen ASTM E4 standardına göre de uygun olacağını gösterir.

Sonuç olarak, ISO 7500-1 standardına göre göre yapılan kalibrasyon ile ASTM E4 standardına göre yapılan kalibrasyon işlemleri oldukça benzerdir. ISO 7500-1 standardının ölçüm noktaları, ölçüm belirsizliği parametreleri ve Sınıf 1'i sağlayan bir cihazın ASTM E4 standardı gerekliliklerini de karşılaması muhtemeldir.

Malzeme test makinası kuvvet ölçme sistemi için kalibrasyon hizmeti aldığınızda her iki standarda uygun olarak kalibrasyon yapılabilir. Ancak bu farklılıkları iyi bilmesi durumda daha doğru bir değerlendirme yapılması mümkün olacaktır. Bu çalışma akredite olacak laboratuvarlara bir rehber ve kullanıcıların kalibrasyon sonuçlarını değerlendirilmesinde farkındalık oluşturmak amacıyla hazırlanmıştır.

KAYNAKLAR

1. ISO 7500-1:2018, Metallic Materials-Verification of Static Uniaxial Testing Machines Tension/Compression Testing Machines-Verification and Calibration of the Force-Measuring Systems.
2. ASTM E4-21, 2021, Standard Practices for Force Verification of Testing Machines
3. ISO 376:2011, Metallic Materials-Calibration of Force-proving Instruments Used for the Static Verification of Uniaxial Testing Machines
4. ASTM E74-18, 2019, Standard Practice of Calibration of Force-Measuring Instruments
5. Aydemir B. (2021), Kuvvet Kalibrasyon Rehberi, 1. Basım, Gebze, TÜBİTAK UME, Eylül, 2021, ISBN: 978-605-312-399-6
6. Aydemir B. (2024), ISO 7500-1 ve ASTM E4 kuvvet kalibrasyon standartları arasındaki farklara ilişkin bir inceleme çalışması, 4. International Trakya scientific research and innovation congress,20-21 July, Edirne, Turkiye
7. ASTM E83, 2023, Standard Practice for Verification and Classification of Extensometer Systems
8. ISO 9513, 2022, Metallic materials — Calibration of extensometer systems used in uniaxial testing
9. ASTM E1012, 2020, Standard Practice for Verification of Testing Frame and Specimen Alignment Under Tensile and Compressive Axial Force Application
10. ASTM E18, 2017, Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials
11. ASTM E10, 2010, Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials
12. ASTM E92, 2024, Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials
13. ASTM A956, 2022, Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products
14. ASTM E2658, 2023, Standard Practices for Verification of Speed for Material Testing Machines
15. ASTM E2309, 2020, Standard Practices for Verification of Displacement Measuring Systems and Devices Used in Material Testing Machines
16. Aydemir, B., Dizdar, H., Vatan,C., “Tek Eksenli Statik Malzeme Test Makinalarının Kuvvet Kalibrasyonu Eğitim Dokümanı”, G2KV-020, TÜBİTAK UME Gebze-Kocaeli, Mayıs 2018

17. Aydemir B., Dizdar H.,Vatan C., “EN ISO 376 Standardına Göre Kuvvet Ölçme Cihazlarının Kalibrasyonunda Belirsizlik Hesabı ve İrdelenmesi” Kuvvet Laboratuvarı Teknik Dokümanı, TÜBİTAK UME, S.2, N.1, 2019 (1-11)

18. Zumbrun, H., 2018, An Introduction to the Differences Between the Two Most Recognized Force Standards, Cal Lab, The International Journal of Metrology, Jan, Feb, Mar 2018, (26-30)

19. Dizdar H., Aydemir B., Vatan C., “ISO 7500-1 Standardına Göre Tek Eksenli Statik Malzeme Test Makinalarının Kuvvet Kalibrasyonunda Belirsizlik Hesabı ve İrdelenmesi” Kuvvet Laboratuvarı Teknik Dokümanı, S.2, N.2, 2019 (12-24)

BÖLÜM 3

Başmakçı (Afyonkarahisar) Biyokütle Enerji Santralının Olası Çevresel Etkileri

Mehmet Özçelik [1]

[1] Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği, Isparta, Türkiye, Orcid ID: 0000-0003-4511-1946

1. Giriş

Biyokütle, kömür, petrol ve doğal gazdan sonra dünyanın dördüncü büyük enerji kaynağıdır (Geng vd. 2020). Fosil yakıt fiyatlarındaki artış, enerji arz-talep dengesizliği, enerji güvenliği, çevresel kaygılar ve sera gazı emisyonlarını azaltma ihtiyacı göz önüne alındığında, biyokütle bir enerji kaynağı olarak kritik ve ilgi çekici bir konu haline gelmiştir (Alcala vd. 2011; Enagi vd. 2018). Dünya Enerji Konseyi'nin bir raporuna göre, 2050 yılına kadar biyokütle enerjisi, dünya enerji arzının %25-33'ünü oluşturacaktır (D'Agosto vd., 2015). Biyokütle enerji üretim sistemleri çeşitlenmekte ve biyorafinelerin çeşitli gıda, enerji ve biyomalzeme ürünleri üretmesine olanak tanıyan teknolojiler geliştirilmektedir; bu nedenle, belirli ürünlerle ilişkili arazi ayak izini belirlemek giderek daha az önem kazanmakta ve zorlaşmaktadır. Biyokütle, en bol ve erişilebilir atıklardan biri olarak kabul edilir ve biyoenerji üretmek için kullanılabilen bir karbon taşıyıcısıdır (Uslu vd. 2008). Bununla birlikte, ham biyokütle, yüksek nem içeriği, düşük enerji yoğunluğu, hidrofilite ve yüksek alkali içeriği gibi çeşitli dezavantajları nedeniyle daha az çekicidir; bu da biyokütlenin taşınmasını, depolanmasını ve kullanımını zorlaştırır (Uddin vd. 2014). Piroliz (Balat vd. 2011; Siemons 2002), gazlaştırma (Schafer 1999), hidrotermal karbonizasyon ve anaerobik sindirim gibi termokimyasal ve biyokimyasal dönüşüm teknolojileri (Balat 2008), bu engellerin üstesinden gelmek için kullanılır. Bu teknolojiler arasında, nispeten daha düşük sıcaklıkları ve yüksek nem içeriğine sahip biyokütle ile başa çıkabilme yetenekleri nedeniyle anaerobik sindirim ve hidrotermal karbonizasyon büyük önem taşımaktadır. Anaerobik sindirim, mikroorganizmaların oksijen yokluğunda biyolojik olarak parçalanabilir maddeleri parçaladığı bir dizi süreçtir. Anaerobik sindirimin ana ürünü, metan, karbondioksit ve eser miktarda diğer gazlardan oluşan biyogazdır (Pecchi ve Baratieri 2019). Biyogaza ek olarak, sindirim artığı, sindirilemeyen artık maddelerden ve ölü mikroorganizmalardan oluşan anaerobik sindirimin bir yan ürünüdür. Biyokütle ayrıca doğrudan yakılarak enerji üretebilir. Termokimyasal süreçler (hidrotermal karbonizasyon gibi) (Kumar vd. 2017) ve biyokimyasal süreçler (anaerobik sindirim gibi) son yıllarda oldukça dikkat çekse de, doğrudan yakma (ham biyokütlenin ısı üretmek için fazla havada yakılması) belki de biyokütleyi biyoenerjiye dönüştürmenin en basit yoludur (Rahdar vd. 2019; Cherubini vd. 2011; Heidari vd. 2019). Bu nedenle, biyokütlenin biyoenerjiye dönüştürülmesine yönelik önerilen sistemler, doğrudan yakma ile karşılaştırılmalıdır. Türkiye'nin biyokütle atık potansiyelinin yaklaşık 8,6 milyon ton petrol eşdeğeri (MTEP) olduğu ve üretilebilecek biyogaz miktarının 1,5-2 MTEP olduğu tahmin edilmektedir. Enerji ve Doğal Kaynaklar Bakanlığı tarafından biyokütle enerji potansiyelini belirlemek amacıyla hazırlanan Biyokütle Enerji Potansiyeli Atlası (BEPA) verilerine göre, atıklarımızın toplam ekonomik enerji eşdeğeri yaklaşık 3,9 MTEP/yıl'dır (ETKB 2021). Elektrik üretiminde de yaygın olarak kullanılan biyokütle enerjisine dayalı kurulu güç,

Aralık 2020 sonu itibarıyla 1485 MW'tır (bunun 369 MW'ı atık ısıdır) ve toplam elektrik üretimindeki payı %1,80'dir. Son yıllarda ülkemizdeki biyokütle enerji santrallerinin sayısı ve elektrik üretimindeki payları hızla artmaktadır. Elektrik Mühendisleri Odası'nın Şubat 2021 istatistiklerine göre, ülkemizde elektrik üretiminde biyokütle enerji santrallerinin payı yaklaşık %1,5 civarındadır. Enerji Atlası verilerine göre, Türkiye'de halen 199 adet biyokütle kaynaklı enerji üretim santrali bulunmaktadır. Bu yazıda, enerji üretiminde biyokütle üretim teknolojilerinin önemine dikkat çekilmek istenilmiştir. Bu amaçla, Başmakçı biyokütle enerji santralinin olası çevresel etkileri incelenmiştir. Bu biyokütle enerji santralının kullanım amaçları incelenmiştir. Çevreye olası etkileri ve toplumun endişelerinin en aza indirilmesi hedeflenmiştir.

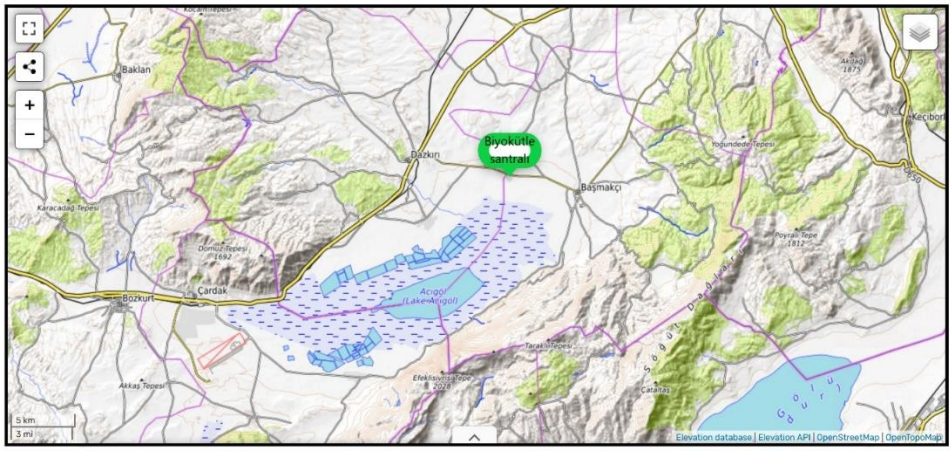
2. Malzeme ve Yöntemler

2.1. Biyokütle Enerji Teknolojileri

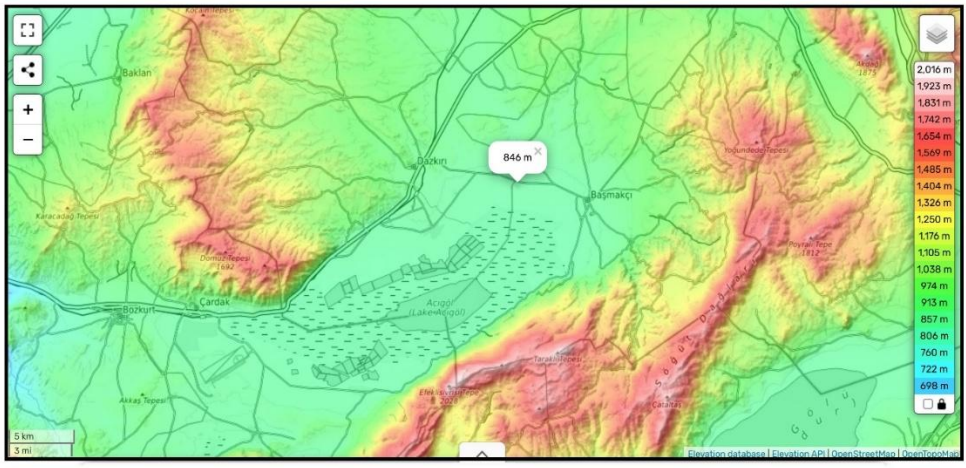
Biyokütle çeşitli yollarla enerjiye dönüştürülebilir. Termokimyasal süreçler, piroliz, gazlaştırma, yanma ve biyolojik süreçler, fermantasyon, anaerobik sindirim ve biyofotoliz süreçleri gibi ana süreçler, biyokütle enerji dönüşüm yöntemleri olarak açıklanmıştır. Bu süreçlerin, biyokütle kaynağına ve elde edilen enerji türüne göre kendi avantajları vardır. Biyokütle modern teknolojiler kullanılarak dönüştürülürse ve enerji dönüşüm verimliliği sağlanırsa, biyokütle enerjisi gelecekte birincil enerji kaynağı olabilir. Biyokütleye uygulanan termokimyasal dönüşüm tekniklerinin genellikle çevre dostu (kömüre kıyasla CO_2 nötr ve kirletici emisyonları çok düşük olduğu için) ve ekonomik olduğu düşünülmektedir (Kar ve Keles 2016; Kar vd. 2018). Termokimyasal dönüşüm teknolojileri genellikle çevre dostu (biyokütle CO_2 nötrdür ve kirletici emisyonları kömüre kıyasla daha az belirgindir) ve ekonomik açıdan sağlam olarak kabul edilir (Kovacs vd. 2016; Mladenović vd. 2018). Öte yandan, biyokütle yakıtlarının yakılması, fosil yakıtların yakılması, uçucu organik bileşikler, partikül madde, karbonmonoksit (CO) ve karbondioksit (CO_2) gibi potansiyel olarak tehlikeli kirleticiler üretir. CO_2, küresel ısınma ve iklim değişikliğinin önde gelen nedenlerinden biri olan bir sera gazıdır (Abbasi ve Abbasi 2010; Wu vd. 2018).

2.2. Çalışma alanı ve biyokütle temini

Çalışma alanı olarak Afyonkarahisar ili, Başmakçı ilçesinde bulunan biyokütle santral alanı ve çevresi seçilmiştir (Şekil 1). Proje alanının kuş uçumu yaklaşık 1,8 km kuzeyinde Akkeçili Köyü, 3,5 km güneydoğusunda Başmakçı İlçesi, 5,9 km güneybatısında Yüreğil Köyü, 5,5 km güneydoğusunda Başmakçı İlçe Merkezi, 7 km batısında Dazkırı İlçesi yer almaktadır. Proje alanına en yakın konut kuş uçumu yaklaşık 200 m kuzeybatısında yer alan Merkez/Başmakçı sınırlarında yer alan bir tesistir. Proje alanının yüksekliği 846 m dir.



Şekil 1. Başmakçı Biyokütle Santralı Yer Bulduru Haritası



Şekil 2. Yükseklik Haritası

Afyonkarahisar ili, ülke ekonomisinde önemli bir yere sahip olup Türkiye'deki elektrik tüketiminin büyük bir kısmının gerçekleştiği yerdir. Afyonkarahisar ilinde jeotermal, rüzgar, güneş enerjisi ve hidroelektrik santralleri bulunmaktadır. Afyonkarahisar ilinde elektrik tüketiminin sürekli artması nedeniyle mevcut enerji santralleri ve iletim hatları yetersiz kalmış ve aşırı yüklenmelerden kaynaklanan plansız elektrik kesintileri yaşanmıştır. Bu kesintilerin sanayide çok önemli üretim kayıplarına ve kalite bozulmasına, tesislere ise büyük zararlara yol açtığı göz önüne alındığında, bölgede birçok farklı enerji santralleri (rüzgar, güneş enerjisi ve jeotermal enerjisi) inşa edilmektedir. Başmakçı biyokütle santralının amacı Afyonkarahisar iline temiz ve güvenli enerji sağlamaktır. Ayrıca, Afyonkarahisar, hayvancılık (kümes hayvancılığı, büyük baş, küçük baş) ve bitki üretim değerleri açısından ülke geneline kıyasla çok iyi bir konumdadır. Özellikle Başmakçı ilçesinin kümes hayvanı ve yumurta üretim değeri oldukça

iyidir. Bu bağlamda, oldukça güçlü olan sanayinin genişlemesi ve enerji üretim faaliyetlerinin yoğunlaşması sırasında ilin verimli tarım arazilerine zarar vermeyecek önlemler alınması gerekmektedir.

3. Biyokütle Enerji Santrallerinin Biyokütle Dönüştürme Teknikleri

Tüm yenilenebilir enerji kaynakları arasında, biyokütle enerjisi, biyokütle hammaddesinin elde edildiği arazinin konumu, hammadde türü ve enerji santralinde kullanılan süreçle ilgili olarak çok çeşitli çevresel ve sosyal yönlere (olumlu ve olumsuz) neden olma potansiyeline sahiptir (Florine vd. 2006; Tonn vd. 2010) (Gillitzer vd. 2013). Biyokütle santrallerinde; yanma ve anaerobik sindirim, lignoselülozik düşük girdili yüksek çeşitlilikli sistem biyokütlesi için umut vadeden dönüşüm yolları olarak önerilmiştir (Prochnow vd., 2009 a,b), çünkü her iki teknoloji de merkezi olmayan biyokütle kullanımına uygundur (Obernberger 1998; Appels vd. 2011; Hensgen vd. 2011; Van Meerbeek vd. 2015). Başmakçı Biyokütle Enerji Santrali incelenmiştir. Tavuk, sığır gübresi ve tarımsal atık biyokütlesinin kullanımı üzerine yapılan mevcut Başmakçı Biyokütle enerji santralinde anaerobik sindirim (oksijensiz fermantasyon) kullanılmaktadır.

3.1. Başmakçı Biyokütle Enerji Santrali

Afyonkarahisar'da tavuk ve büyükbaş hayvan dışkılarını ısı ve elektriğe dönüştürecek Başmakçı Biyogaz Tesisi (8 MWe/8,32 MWm/9,4 MWt) 75.609.170 TL bedeli ile faaliyete geçmiştir. Proje kapsamında günde 740 ton tavuk dışkısı atıkları ve 360 ton büyükbaş hayvan dışkısı atıkları anaerobik koşullarda işlenerek biyogaza ve hemen arkasından üretilen biyogaz güç ünitesinde elektrik enerjisine dönüştürülmektedir (Şekil 3-4). Ayrıca az da olsa besleme menüsünü zenginleştirmek amacıyla çevrede mevcut tarımsal kaynaklı bitkisel atıkların da (hayvansal yem atıkları, sap, saman, mısır silajı ve tarım arazilerinde kalan bitki dokusu atıkları) ilerleyen dönemde kullanılması planlanmaktadır. Tesis toplamda 8 MW/saat elektrik üretim kapasitesinde olan ve aynı zamanda kojenerasyon vasıtasıyla 9,40 MWt değerinde ısıl güç oluşturmaktadır. Başmakçı ilçesinde 4 milyon adet yumurta tavuğu ve buna ek olarak 13.700 büyükbaş hayvan varlığının bulunduğu tespit edilmiştir (Bioden Enerji PTD, 2023).



Şekil 3. Başamakçı Biyogaz santralının uydu görüntüsü



Şekil 4. Başamakçı Biyogaz santralının genel görünümü

Biyokütle enerji santralinde, tavuk gübresi, tarımsal atıklar ve diğer atıklar, sirkülasyonlu akışkan yataklı bir kazanda yakılarak aşırı ısıtılmış buhar üretilecek ve bu buhardan, ona bağlı bir buhar türbini ve jeneratör vasıtasıyla elektrik enerjisi üretilecektir. Biyokütle tesisinde enerji üretimi sonucu oluşan sıvı fermente ürünün bir kısmı geri devirle hammadde hazırlamaya gönderilerek hayvansal ve bitkisel atıkların sulandırılmasında kullanılmaktadır. Geriye kalan kısmı seperatöre gönderilerek su fazı ile katı fazın ayrıştırılması sağlanmaktadır. Ayrıştırılan sıvı fermente ürün; sızdırmasız ve hava şartlarından etkilenmeyecek lagünlerde depolanarak sıvı gübre olarak tarım arazilerinde kullanılmak üzere talep doğrultusunda verilmektedir. Üretilen enerji, şalt sistemi aracılığıyla ulusal

elektrik şebekesine aktarılacaktır. Üretilen elektrik, orta gerilim hattına verilecek ve birbirine bağlı şebekeye iletilmektedir. Ayrıca, söz konusu tesisin kurulmasıyla birlikte, bölgedeki tavuk çiftliklerinin atıkları ve özellikle organik maddeler tesise alınarak bertaraf edilmektedir.

3.2. Başmakçı Biyokütle Enerji Santrali Teknolojisi

Başmakçı Biyokütle Enerji Santrali Üretim Tesisinin işletme aşamasında proseslerden susuzlaştırma sonrası ortaya çıkacak yaklaşık 660 ton/gün işlenmiş fermente proses sıvısının yaklaşık 330 ton/gün`ü geri devirle hammadde hazırlamaya gönderilerek hayvansal ve bitkisel atıkların sulandırılmasında kullanılmaktadır. Bu işlenmiş sıvı fermente ürünün kalan kısmı ise sera ve tarım arazilerinde kullanımına uygun nitelikte sıvı gübre olması nedeniyle; tarım arazilerine verilmek suretiyle tarımsal amaçlı üretimde kullanılmaktadır (BİODEN ENERJİ ÜRETİM SANAYİ VE TİCARET A.Ş. PTD, 2023; 2025).

4. Biyokütle Enerji Santralinin Potansiyel Çevresel Etkileri

Biyokütle tesisinde enerji üretimi sonucu oluşan sıvı fermente ürünün bir kısmı geri devirle hammadde hazırlamaya gönderilerek hayvansal ve bitkisel atıkların sulandırılmasında kullanılmaktadır. Geriye kalan kısmı seperatöre gönderilerek su fazı ile katı fazın ayrıştırılması

sağlanmaktadır. Ayrıştırılan sıvı fermente ürün; projeye konu ilave saha üzerinde kurulması planlanan Sıvı Filtrasyon Tesisine gönderilecektir. Burada %3 kuru madde ile gelen sıvının içerisindeki katı askıda katı maddeleri filtre edilerek, açığa çıkan katı partikülleri kompost alanına filtre edilen sıvıyı da pompa ile lagüne sevk edilmesi planlanmaktadır. Sızdırmasız ve hava şartlarından etkilenmeyecek lagünlerde depolanan sıvı gübre olarak tarım arazilerinde kullanılmak üzere talep doğrultusunda verilmektedir.

4.1. Arazi Kullanımı

Başmakçı biyokütle santralı Acıgöl Havzasının kuzeyindedir. Havza 1292 km^2 lik yüzey sahiptir. Acıgöl çevresinde yarı kurak iklim şartları etkisini göstermektedir. Çok az bitki örtüsünün bulunduğu havzanın en derin kısımlarını işgal etmiş playa karakterli bir göl ile karakterize olmaktadır. Göl kıyılarında yıllık toplam yağış miktarı 368-392 mm arasında, yıllık ortalama sıcaklık ise 13 $^{\circ}C$' dir. Acıgöl tektonik -karstik kökenli çöküntünün düz taban kesimine yerleşmesi nedeniyle, mevsimsel seviye değişimleri geniş bir alanda görülmektedir. Kuraklık ve aşırı su kullanımı nedeniyle gölün alanı her geçen gün küçülmektedir. 1970 yılında 160 km^2 olan göl alanı, 2008 yılında 50 km^2 gerilemiştir. Bu durumun ortaya çıkmasında, havza ikliminde son yıllarda meydana gelen değişimlerin ve küresel ısınmanın önemli rolü vardır. Özellikle, aşırı sıcaklıklar ve artan buharlaşma yağıştaki azalma, aşırı su tüketimi ve tarımsal su kullanımı yarı kurak iklim şartlarının hüküm sürdüğü havzada çölleşmeye neden olmuştur. Gölün çekildiği geniş alanlarda tuz, tuz kristalleri ve

kumullar oluşmaktadır. Biyoenerji üretimi, arazi kullanımı açısından dikkatlice yönetilmesi gereken bazı riskler içermektedir. Enerji üretimi için alan yaratmak amacıyla tarım arazilerinin tahrip edilmesi gibi arazi kullanımındaki değişiklikler, biyokütle enerjisi kullanımının faydalarını azaltırken bazı olumsuzluklara da yol açabilir.

4.2. Toprak Kalitesi

Biyoenerji üretiminde tarımsal ürünlerin veya tavuk ve sığır gübresinin kullanılması, toprak kalitesinin düşmesine ve topraktaki faydalı besin maddelerinin tükenmesine yol açabilir. Öte yandan, atıkların işlenmesinin toprak kalitesi üzerindeki olumlu etkisi, gübre olarak kullanılmasıdır. Acıgöl Havzasında sürdürülebilir uygulamalarla uygun biyokütle hammaddelerinin kullanılması, bozulmuş arazilerin rehabilitasyonuna katkıda bulunabilir ve bu da toprak kalitesini artırabilir. Biyoenerji üretiminin çevresel riskleri ve potansiyel faydalarının, hammadde, yönetim sistemi, kullanılan teknoloji ve faaliyet bölgesi gibi faktörlere göre farklılık gösterdiği söylenebilir.

4.3. Sera Gazı Emisyonları

Biyokütle hammaddelerinin kontrolsüz yakılması, karbon emisyonlarına yol açarak hava kirliliğine ve bazı sağlık sorunlarına neden olabilir. Bununla birlikte, modern sistemler ve kontrollü yöntemler kullanılarak hava kalitesi gereksinimleri karşılanabilir. Biyokütle üretimi, biyokütle tabanlı enerji sistemlerinin yalnızca bir boyutudur; kullanılabilir enerjiye dönüştürülmesi ise bir diğer ve eşit derecede önemli boyuttur. Biyokütlenin dönüştürülmesi için çeşitli teknolojiler mevcuttur; bunlardan en yaygın kullanılanları doğrudan yakma ve pirolizdir. Günümüzde, bu şekilde biyokütle kullanımının yalnızca sera gazı emisyonlarının değil, aynı zamanda birçok son derece zehirli hava kirleticinin de kaynağı olduğu evrensel olarak kabul edilmektedir (Wu vd. 2018). Sera gazı emisyonlarının azaltılması, biyokütle enerjisi üretiminde dikkate alınan en önemli terimlerden biridir. Sera gazı emisyonları arasında, CO_2 ve N_2O, büyük miktarları ve çoklu üretim yaklaşımları nedeniyle iki ana bileşendir (Dunn vd. 2013; Qin vd. 2016). Teorik olarak, biyoyakıtların doğrudan kullanımından kaynaklanan net CO_2 emisyonları, fosil yakıtların kullanımından çok daha azdır; bu durum birçok çalışma ile kanıtlanmıştır (Dunn vd. 2013; Fu vd. 2014; Wang vd. 2012). Liu vd. (2017), fosil yakıtların yerine biyoyakıtların kullanılmasıyla, marjinal arazilerde maksimum potansiyel switchgrass üretiminin emisyonları yılda 29 milyon ton CO_2 eşdeğeri azaltacağını hesaplamıştır. Fosil yakıt bazlı sistemlerin aksine, biyokütlenin büyümesi ve çürümesi doğal bir döngünün parçası olduğundan, biyoenerji üretimi ve kullanımı genellikle "karbon nötr" olarak kabul edilir. Değerlendirmeler, biyoenerji üretiminin fosil yakıtlara göre çok daha düşük emisyonlara (yaklaşık %80-85) neden olduğunu gösterse de, biyoenerji hammaddeleri sürdürülebilir yöntemlerle üretilmediği takdirde durum böyle değildir. Düşük sera gazı emisyonlu biyokütle hammaddelerinin kullanımı ve

yönetim ve işleme aşamalarında daha fazla verimlilik iyileştirmesi, değer zincirinde sera gazı emisyonlarının optimum düzeyde azaltılmasını sağlar.

4.4. Su Kalitesi

Biyoenerji üretiminin su miktarı üzerindeki etkileri esas olarak biyoenerji bitkilerinin potansiyel su tüketimi ve arazi kullanımının dönüşümü yoluyladır. Biyokütle kaynaklarının araziye dayalı kullanımıyla, üretim alanı içinde ve çevresindeki su kaynaklarının tükenmesi veya kirlenmesi riski vardır. Öte yandan, atık suyun biyoenerji üretiminde ve alglerin biyoyakıt üretiminde kullanılması, kirlenmiş veya besin açısından zengin su akıntılarını temizlemek gibi birçok fayda da sağlamaktadır. Sürdürülebilir uygulamalarla kullanılan uygun biyokütle hammaddeleri, bozulmuş arazilerin rehabilitasyonuna katkıda bulunarak havzaların korunmasını sağlayabilir. Acıgöl Havzasındaki su kaynakları göz önüne alındığında, bölgedeki yeraltı sularının beslenme alanı güney ve kuzeydeki yükseltiler, boşalma alanı ise Acıgöl havzası'dır. Havzanın güney ve kuzeyindeki yükseltiler yeraltı sularının beslenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

4.5. Koku Emisyonu

Tesis özellikle atık geçici depolama ve ön kabul noktaları haricinde ünitelerin tamamı anaerobik şartlarda kapalı ortamda olması sebebiyle koku oluşumu söz konusu olmamaktadır. Ancak, hammadde olarak hayvansal dışkılar kullanılması sebebiyle; atık kabulü ve geçici depolaması yapılan noktalarda ve Fermente ürün depolama alanlarında koku oluşumunu önlemek amacı ile biyofiltre sistemleri tesis edilmiştir. Söz konusu sistem, nemli organik materyallerin kokuya neden olan uçucu yapıdaki molekülleri tutması ve degrade etmesine dayalı olarak çalışmaktadır. Depolama alanlarına döşenen perfore borulara bağlı biçimde yerleştirilen hava blowerları vasıtası ile tek yönlü hava emilimi gerçekleştirilmektedir.

4.6. Doğal Biyoçeşitliliğin, Yaşam Alanlarının ve Yaban Hayatının Kaybı

Doğal ekosistemlerin enerji bitkisi tarlalarına dönüştürülmesi, yaban hayatının ve diğer biyotanın hem yaşam alanlarını hem de besin kaynaklarını değiştirecektir. Ormanların ve sulak alanların değiştirilmesi, bazı memelilerin, kuşların ve diğer biyotanın tercih ettiği birçok yaşam alanını ve üreme alanını azaltacaktır. Hızlı büyüyen ağaçlardan oluşan tek tip ağaçlandırma alanları, bitki örtüsünün çeşitliliğini ve birçok yaban hayatı türü için yaşam alanı olarak alanların değerini azaltır. Bu tek tip ağaçlandırma alanları, iklim ormanlarından daha az istikrarlıdır ve verimliliği korumak için pestisit ve gübre şeklinde artan enerji girdilerine ihtiyaç duyar. Kârlı ağaçlandırma alanlarındaki ağaçlar, doğal ormanlardakilere göre 2-3 kat daha yoğundur; yüksek ağaç yoğunluğu daha büyük haşere sorunlarına yol açabilir. Biyoçeşitlilik üzerindeki risk, büyük ölçüde karasal biyokütle kaynaklarının üretimiyle ilişkilidir.

4.7. Sosyal ve Ekonomik Etkiler

En önemli sosyal etkiler, istihdamda kaymalar ve iş sağlığı ve güvenliği sorunlarında artış olacaktır (Hoekman vd. 2018). Ülkenin enerji ihtiyacı biyokütle kaynaklarından karşılanırsa, toplam istihdamın genel olarak artması beklenmektedir. İşgücü, biyokütle kaynaklarının kesilmesi, hasat edilmesi ve taşınması için tarım ve orman üretiminde ve dönüştürme tesislerinin işletilmesinde gerekecektir. Odun biyokütle kaynakları için doğrudan işgücü girdileri, milyon kcal başına kömüre göre 2-3 kat daha fazladır. Odun yakıtlı bir buhar santrali, kömür yakıtlı bir santrale göre 4 kat daha fazla inşaat işçisi ve 3-7 kat daha fazla tesis bakım ve işletme işçisi gerektirir. Mısır üretimi için gereken işgücü de dahil olmak üzere, bir milyon kcal etanol üretmek için eşdeğer miktarda benzine göre yaklaşık 18 kat daha fazla işgücü gereklidir. Biyoenerji üretimi ve kullanımı, toprak ve su kalitesi, arazi mülkiyeti ve güvenli çalışma koşulları gibi birçok konuyu etkiler. Bu nedenle, biyoenerji üretimi ve kullanımının sonuçları dikkate alınarak kontrollü yöntemlerle yapılmalıdır.

5. Sonuçlar

Afyonkarahisar'ın Başmakçı ilçesinde faaliyet gösteren biyokütle santralı, hayvansal atıkları ve tarımsal kalıntıları işleyerek yenilenebilir elektrik ve organik gübre üreten bir tesistir. Biyogaz üretiminde hammadde olarak tavuk ve büyükbaş hayvan dışkıları ve besleme menüsünü zenginleştirmek amacıyla tarımsal kaynaklı bitkisel atıklar kullanılmaktadır. Biyoenerji, büyük miktarda bulunması ve yenilenebilirliği nedeniyle geleneksel fosil yakıtlara kıyasla belirgin avantajlara sahiptir ve bu nedenle küresel enerji güvenliğinin korunmasında hayati bir rol oynamaktadır. Bununla birlikte, biyoenerji üretimi uygulanırken kaynak ve çevresel maliyetin dikkate alınması önemlidir. Biyoenerji üretimi, arazi kullanımı, toprak kalitesi, sera gazı emisyonları, su kalitesi, kaplıcalar, doğal biyoçeşitlilik kaybı, habitatlar ve yaban hayatı, besin maddelerinin uzaklaştırılması ve kaybı, bitki türleri ve sosyo-ekonomik etkiler üzerinde gerçekten olumsuz etkilere sahip olabilir. Bu etkiler, biyoenerji üretim teknolojisine bağlı olarak değişmektedir. Türkiye'nin büyük bir biyoenerji üretim potansiyeli vardır, ancak biyoenerji üretimi geride kalmakta ve artan enerji tüketimine ayak uyduramamaktadır. Gelecekteki araştırmalar, bu alanda önde gelen ülkelerden ders çıkarmalı, daha fazla bilgi edinmeli ve Türkiye ve diğer gelişmekte olan ülkelerde biyoenerjinin geliştirilmesine rehberlik edecek optimal karar destek sistemleri geliştirmelidir. Biyogaz üretim sistemlerinin çevresel etkileri göz önünde bulundurularak, sistemin analitik yaklaşımında biyogaz üretiminin yarattığı emisyonlar ve enerji performansları da dahil olmak üzere yaşam döngüsü analizi yapılmalı ve olumlu ve olumsuz yönleri ortaya çıkarılmalıdır. Tüm bunların yanı sıra, biyokütle teknolojisinin faydaları ve kullanım kolaylığı da en kısa sürede kamuoyuna aktarılmalıdır. Genel olarak, bu çalışma çevre koruma planlamasının yanı sıra biyokütle enerjisi geliştirme konusunda da bilgilendirici olabilir.

Kaynaklar

Abbasi T, Abbasi SA (2010) Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14:919–937. doi:10.1016/j.rser.2009.11.006

Alcala A, Bridgwater A, Vos J (2011) Biomass Fuelled Combined Heat and Power-situation in the UK and The Netherlands. Available at: http://www.bioliquids-chp.eu/uploads/site/Publications/Bioliquids-CHP%20-%20paper%20Birmingham.pdf (Accessed 28 December 2021).

Appels L, Lauwers J, Degreve J, Helsen L, Lievens B, Willems K, Impe JW, Dewil R (2011) Anaerobic digestion in global bio-energy production: potential and research challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15:4295–4301.

Balat M (2008) Global trends on the processing of bio-fuels. International Journal of Green Energy 5 (3): 212-238.

Balat M (2011) An overview of the properties and applications of biomass pyrolysis oils. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects 33(7):674-689.

BİODEN ENERJİ ÜRETİM SANAYİ VE TİCARET A.Ş. (2023) Nihai Proje Tanıtım Dosyası, https://eced-duyuru.csb.gov.tr/eced-prod/duyurular.xhtml

BİODEN ENERJİ ÜRETİM SANAYİ VE TİCARET A.Ş. (2025) Nihai Proje Tanıtım Dosyası, https://eced-duyuru.csb.gov.tr/eced-prod/duyurular.xhtml

Cherubini F, Peters GP, Berntsen T, Strømman AH, Hertwich E (2011) CO_2 emissions from biomass combustion for bioenergy: Atmospheric decay and contribution to global warming. GCB Bioenergy 3:413–426.

D'Agosto M, Silva M, Oliveira C, Franca L, Marques L, Murta A, Freitas M (2015) Evaluating the potential of the use of biodiesel for power generation in Brazil. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 43:807-817. 10.1016/j.rser.2014.11.055.

Dunn JB, Mueller S, H-y Kwon, Wang MQ (2013) Land-use change and greenhouse gas emissions from corn and cellulosic ethanol. Biotechnol Biofuels 6:51

Enagi II, Al-Attab KA, Zainal ZA (2018) Liquid biofuels utilization for gas turbines: a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 90:43-55.

ETKB (2021) Ulusal Enerji Denge Tabloları. https://www.eigm.gov.tr/tr-TR/Denge-Tablolari/Denge-Tablolari", Erişim tarihi: 03.11.2021

Florine SE, Moore KJ, Fales SL, White TA, Lee Burras C (2006) Yield and composition of herbaceous biomass harvested from naturalized grassland in southern Iowa. Biomass and Bioenergy 30:522–528.

Fu J, Jiang D, Huang Y, Zhuang D, Ji W (2014) Evaluating the marginal land resources suitable for developing bioenergy in Asia. Adv Meteorol 2014:1–9

Gillitzer P, Wyse D, Sheaffer C, Taff S, Lehman C (2013) Biomass production potential of grasslands in the oak savanna region of Minnesota, USA. BioEnergy Research 6:131–141.

Gong L, Yang Z, Li K, Wei X, Changpeng L, Junjie G (2018) Recent development of methanol electrooxidation catalysts for direct methanol fuel cell. Journal of Energy Chemistry 27 (6):1618-1628.

Hensgen F, Richter F, Wachendorf M (2011) Integrated generation of solid fuel and biogas from green cut material from landscape conservation and private households. Bioresource Technology 102:10441–10450.

Heidari M, Garnaik PP, Dutta A (2019) The Valorization of Plastic Via Thermal Means: Industrial Scale Combustion Methods. In Plastics to Energy; William Andrew Publishing: Norwich, NY, USA, pp. 295–312.

Hoekman SK, Broch A, Liu X (2018) Environmental implications of higher ethanol production and use in the US: a literature review. Part I-impacts on water, soil, and air quality. Renew Sustain Energy Rev 81:3140–3158

Kar T, Keles S (2016) Environmental impacts of biomass combustion for heating and electricity generation. J Eng Research and Applied Science 5(2): 458-465.

Kar T, Keles S, Kaygusuz K (2018) Thermal processing technologies for biomass conversion to clean fuels. Journal of Engineering Research and Applied Science. 7(2):972-979. ISSN 2147-3471

Kovacs H, Szemmelveisz K and Koas T (2016) Theoretical and experimental metals flow calculations during biomass combustion. Fuel 85:524-531.

Kumar G, Shobana S, Chen W-H (2017) A review of thermochemical conversion of microalgal biomass for biofuels: chemistry and processes. Green Chemistry 19 (1):44-67.

Liu T, Huffman T, Kulshreshtha S, McConkey B, Du Y, Green M, Liu J, Shang J, Geng X (2017) Bioenergy production on marginal land in Canada: potential, economic feasibility, and greenhouse gas emissions impacts. Appl Energy 205:477–485

Mladenović M, Paprika M and Marinković A (2018) Denitrification techniques for biomass combustion. Renew Sust Energ Rev 86:3350-3364.

Obernberger I (1998) Decentralized biomass combustion: state of the art and future development. Biomass and Bioenergy 14:33–56.

Ozturk M, Saba N, Altay V, Iqbal R, Hakeem KR, Jawaid M, Ibrahim FH (2017) Renewable and Sustainable Energy Reviews 79:1285–1302

Pecchi M, Baratieri M (2019) Coupling anaerobic digestion with gasification, pyrolysis or hydrothermal carbonization: A review. Renew. Sustain. Energy Rev. 105:462–475.

Prochnow A, Heiermann M, Plochl M, Amon T, Hobbs PJ (2009a) Bioenergy from permanent grassland – A review: 2 Combustion. Bioresource Technology 100:4945–4954.

Prochnow A, Heiermann M, Plochl M, Linke B, Idler C, Amon T, Hobbs PJ (2009b) Bioenergy from permanent grassland – A review: 1 Biogas. Bioresource Technology 100:4931–4944.

Qin Z, Dunn JB, Kwon H, Mueller S, Wander MM (2016) Influence of spatially dependent, modeled soil carbon emission factors on life-cycle greenhouse gas emissions of corn and cellulosic ethanol. GCB Bioenergy 8(6):1136–1149

Rahdar MH, Nasiri F, Lee BA (2019) Review of Numerical Modeling and Experimental Analysis of Combustion in Moving Grate Biomass Combustors. Energy Fuels 33:9367–9402.

Schafer H-J (1999) Process and Apparatus for Coating Printed Circuit Boards. United States Patent Application, Washington DC.

Siemons R (2002) An assessment of biomass gasification and liquefaction (pyrolysis) in view of economic efficiency and sustainability. In: 12th European Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, Amsterdam, 2002.

Souza GM, Ballester MVR, de Brito Cruz CH, Chum H, Dale B, Dale VH, Fernandes ECM, Foust T, Karp A, Lynd L, Maciel Filho R, Milanez A, Nigro F, Osseweijer P, Verdade LM, Victoria RL, Van der Wielen L (2017) The role of bioenergy in a climate-changing world. Environ Dev 23:57–64

Tonn B, Thumm U, Claupein W (2010) Semi-natural grassland biomass for combustion: influence of botanical composition, harvest date and site conditions on fuel composition. Grass and Forage Science 65:383–397.

Uslu A, Faaij APC, Bergman PCA (2008) Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation. Energy 33: 1206–1223.

Uddin MH, Reza MT, Lynam JG, Coronella CJ (2014) Efects of Water Recycling in Hydrothermal Carbonization of Loblolly Pine. Environ. Prog. Sustain. Energy 33:1309–1315.

Van Meerbeek K, Appels L, Dewil R, Van Beek J, Bellings L, Liebert K, Muys B, Hermy M (2015) Energy potential for combustion and anaerobic digestion

of biomass from low-input high-diversity systems in conservation areas. GCB Bioenergy 7:888–898. doi: 10.1111/gcbb.12208

Wang M, Han J, Dunn JB, Cai H, Elgowainy A (2012) Well-to-wheels energy use and greenhouse gas emissions of ethanol from corn, sugarcane and cellulosic biomass for US use. Environ Res Lett 7(4):045905

Wu Y, Zhao F, Liu S, Wang L, Qiu L, Alexandrov G, Jothiprakash V (2018) Bioenergy production and environmental impacts. Geosci. Lett. 5:14. https://doi.org/10.1186/s40562-018-0114-y

BÖLÜM 4

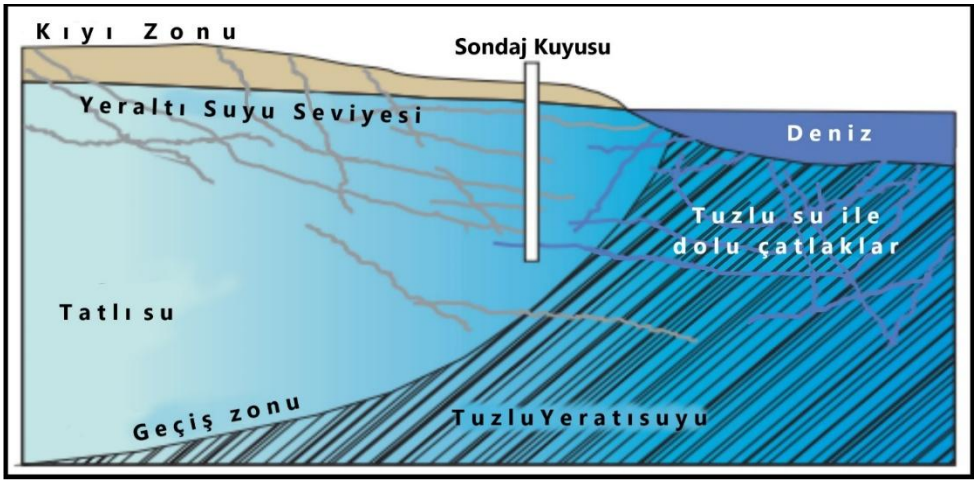
Gazipaşa İlçesi (Antalya/Türkiye) Kıyı Zonunda Sulama Amaçlı Su Sondajlarına Tuzlu Su Girişim Riskinin Araştırılması

Mehmet Özçelik [1]

[1] Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği, Isparta, Türkiye, Orcid ID: 0000-0003-4511-1946

GİRİŞ

Deniz veya tuzlu göllerden tatlı su akiferlerine tuzlu su girişi, bu kaynakların içme kalitesini düşürür. Bunun için; kıyı bölgelerindeki tuzlu su girişini izlemek ve yönetmek için kullanılan birçok yaklaşımı ve aracı tanımlamak ve gelecekte tuzlu su sızma sorunlarının ele alınmasına ilişkin beklentilerin kısa bir değerlendirmesini sağlamaktır. Tuzlu su girişini yönetmek için, öncelikle problemin kapsamını ve tuzlu su girişinin meydana geldiği fiziksel mekanizmaları anlamak gerekir. Tatlı-tuzlu su girişim modeli Şekil 1 'de görülmektedir.



Şekil 1. Tatlı-tuzlu su girişim modeli

Batı Akdeniz bölgesinin'nın kıyı zonları çok çeşitli hidrojeolojik ortamlarla karakterize edilir. Kıyı bölgelerinde çok sayıda jeolojik oluşum türü olmasına rağmen, en önemli su taşıyan oluşumlar, hem deniz hem de karasal kaynaklı konsolide olmayan ve yarı konsolide siltler, kumlar ve çakıllardır; ve konsolide kayaçlar arasında karbonatlar (öncelikle kireçtaşları), kumtaşları ve mermerlerdir. Kıyı bölgelerindeki yeraltı suyu akış olarak yüzlerce ila onbinlerce kilometrekarelik çok katmanlı, bölgesel ölçekli akiferlere kadar çeşitlilik gösterir. Birçok alanda, kıyı bölgeleri boyunca yeraltı suyu akış sistemleri, birkaç kilometre ile birkaç yüz kilometre arasında değişen akış yolları ile karakterize edilir. Kıyı akiferlerindeki tatlı suyun denize doğru limiti, her akiferden akan tatlı su miktarı, her akiferin ve bitişik çevreleyen birimlerin kalınlığı ve hidrolik özellikleri, tuzlu yüzey suyunun mevcut coğrafi dağılımı ve küresel deniz seviyesi dalgalanmalarının jeolojik tarihi en önemli etmenlerdir.

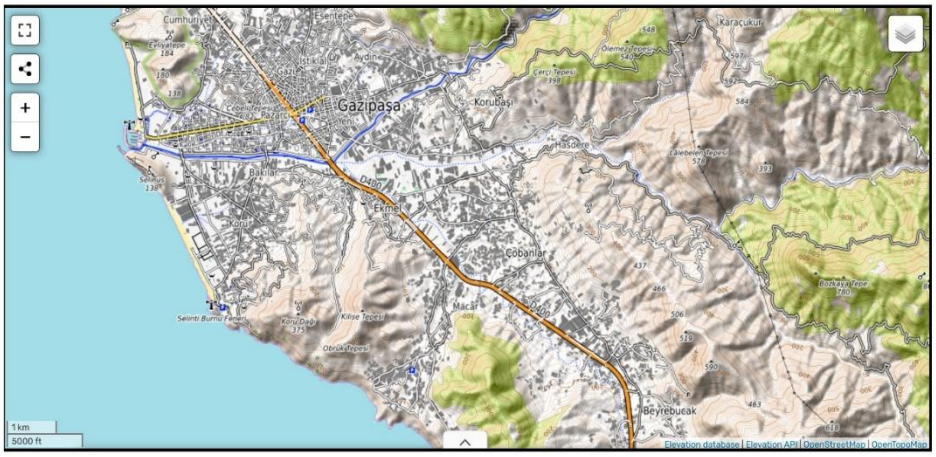
Yapılan bilimsel çalışmalarda, tatlı su ve tuzlu su arasındaki geçiş zonu, nispeten ince akiferlerde 30 m'den daha az kalınlıktan, küresel deniz seviyesindeki dalgalanmaların tekrarlanan ilerlemeye neden olduğu Kuzey Atlantik Kıyı Ovası boyunca 670 m kalınlığa ve 60 km genişliğindeki sınırlı

akiferlere kadar değişmektedir. Tatlı su-tuzlu su arayüzünün karaya doğru pozisyonunun geri çekilmesi tespit edilmiştir. Değişken kalınlıktaki iri taneli katmanlar içinde tuzlu su girişinin meydana gelme eğiliminde olduğu Kaliforniya kıyı akiferlerinde, geçiş bölgesi nispeten dar olabilir (Land ve diğerleri 2004; Izbicki 1996; Hanson ve diğerleri. 2009). Tatlı su-tuzlu su geçiş bölgeleri içindeki karışım, öncelikle, akifer özelliklerindeki uzamsal heterojenliklerden ve gelgit aşamalarındaki nispeten kısa vadeli dalgalanmalardan ve yeraltı suyu yeniden şarj hızlarından bin yıla kadar geniş bir zaman ölçeğinde işleyen dinamik kuvvetlerden kaynaklanan hidrodinamik dağılımdan kaynaklanır. Hidrojeolojik ortamların değişkenliği, tuzlu suyun üç boyutlu dağılımı ve yeraltı suyunun çekilmesi ve tatlı su drenajının geçmişi, Kuzey Amerika'nın kıyı akiferlerine çeşitli şekillerde tuzlu su girişi ile yollarla kirletebilir; bir yeraltı suyu sisteminin daha derin, daha tuzlu bölgelerinden yukarı doğru izinsiz giriş; ve kıyı sularından (köriler ve haliçler gibi) aşağıya doğru izinsiz girişler ve kıyı ovalarının fırtına veya gelgit kaynaklı tuzlu su taşkınları olabilmektedir. Tuzlu su kirliliği problemlerinin çoğu tuzlu suyun akiferler içindeki hareketinden kaynaklansa da, açık sondaj kuyuları, terk edilmiş kuyular, yanlış inşa edilmiş veya aşınmış kuyular boyunca da tuzlu su kirliliği meydana gelmiştir (1996). Bir akifere tuzlu su girişinin kapsamı, bir akiferden çekilen toplam yeraltı suyu oranı ile akifere toplam tatlı su dolumu ile karşılaştırıldığında; kuyulardan ve drenajdan kanallara yapılan pompaj gibi yeraltı suyu deşarj yerleri ile tuzlu su kaynağı (veya kaynakları) arasındaki mesafe; bir akifer veya akifer sisteminin jeolojik yapısı (faylar, kıvrımlar ve sınırlayıcı denizaltı kanyonları gibi yapısal özellikler dahil); bir akiferin hidrolik özelliklerinin dağılımı (çok katmanlı akifer sistemlerinde iri taneli birimlerin birbirine bağlanması dahil); ve tuzlu suyun akifere doğru veya akifer içinde dikey olarak hareket etmesini engelleyebilecek sınırlayıcı birimlerin varlığıdır. Bu makale, kıyı akiferlerine tuzlu su girişi ve ilgili riskler ve yönetim teknikleri ile ilgili mevcut çalışmalara eleştirel bir bakış sunmaktadır. Ayrıca, gelecekteki gelişim için tavsiyeler içeren yeterli araştırma direktifleri de sağlanmaktadır.

JEOMORFOLOJİK ÖZELLİKLER

Gazipaşa Kıyı Ovası, Antalya ilinin Gazipaşa ilçesi sınırları içinde yer almaktadır (Şekil 2). Pleyistosen dönemindeki tektonik hareketler, arazinin jeomorfolojik yapısına etkisi olmuştur. Tektonik hareketler sonucunda değişen yüzey morfolojisi ile birlikte kıyı ovası oluşmuştur. Gazipaşa kıyı ovasının yükseklik haritası Şekil 3'de yer almaktadır. Ovada bulunan yükseltiler Evliya Tepe (180 metre) ve Selinus Tepe (138 metre) dir. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Evliya Tepe ve etrafını "Sürdürülebilir Alan" olarak belirlemiştir (Şekil 4). Gazipaşa Ovası'nın oluşumu ve gelişimi sırasında tektonik hareketlerin yanı sıra akarsu süreçlerinin de önemli bir etkisi olmuştur. Gazipaşa Ovası'nın kuzey ve kuzeydoğu yörelerinden akan Delice, Bıçkıcı ve Hacımusa dereleri Akdeniz'e akmaktadır. Delice Deresi'nin drenaj alanı 135 km^2, Bıçkıcı

Deresi'nin drenaj alanı 158 km^2 ve Hacımusa Deresi'nin drenaj alanı 426 km^2 ve Hacımusa Deresi sürekli akışa sahiptir (Şekil 5).



Şekil 2. Gazipaşa ovası Lokasyon Haritası



Şekil 3. Yükseklik haritası



Şekil 4. Çevre, Şehircilik Ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından ilan edilen 'Sürdürülebilir Alan'



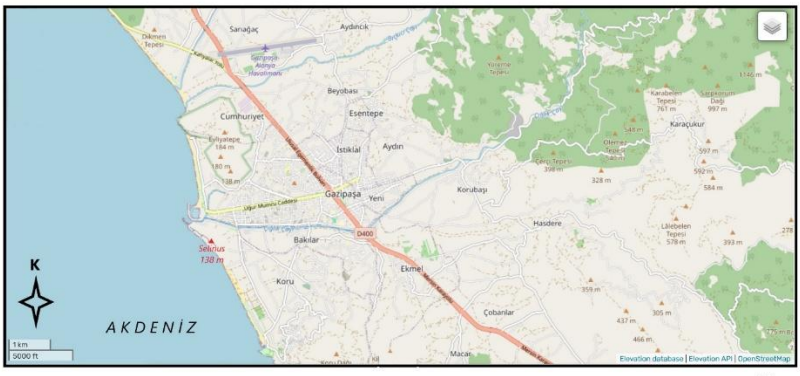
Şekil 5. Hacımusa Deresinin genel görünümü

Yağışlı dönemlerdeki akışa geçen sular genellikle tarımda sulama için kullanılmaktadır (Şekil 6).



Şekil 6. Ovada bulunan sulama kanalı

Gazipaşa ovası kuzeybatı-güneydoğu yönlü faylarla sınırlandırılmıştır. Hacımusa, Bıçkıcı ve Delice Derelerinin getirdiği alüvyonlarla dolarak ova günümüzdeki şeklini almıştır. Bugünkü adıyla Hacımusa Deresi, antik adıyla Selinus Potamos Çayının denize döküldüğü alanda Selinus Antik Kenti bulunmaktadır (Şekil 7).



Şekil 7. Selinus Antik Kentinin Lokasyon Haritası

Antik dönemdeki dağlık Kilikya bölgesi sınırları içerisinde önemli bir liman kentidir. M.Ö. 6. yy. Asur kaynaklarında kentin adının Sallune olarak geçtiği, Pirindu kralı Appuasu'nun egemenlik sınırları içerisinde kaldığı ve deniz yolu ile Kıbrıs ile bağlantılı olduğu tarihi belgelerde saptanmıştır. Daha sonra Selinus, Trajanopolis, Castelo Lombardo gibi isimlerle anılmıştır. Kent Hellenistik, Roma ve Bizans dönemlerinde de yerleşim görmüştür. Bugün için görülebilen kalıntıları özellikle Roma yerleşiminin yoğun olduğunu göstermektedir. Agorası, büyük ve küçük hamamı, hereon tipi anıtsal mezarı, nekropolu, su kemerleri (Şekil 8) günümüzde görülebilen Roma dönemi kalıntılarıdır.

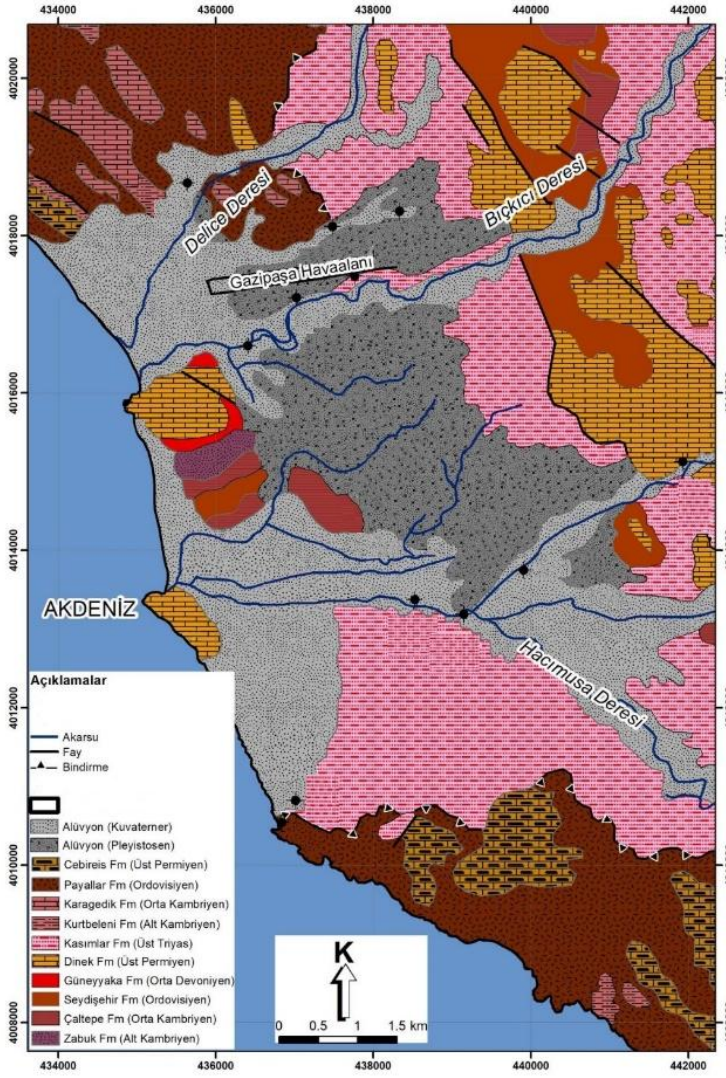


Şekil 8. Ovadan Selinus antik kentine uzanan bulunan Roma döneminden kalma su kemeri kalıntısı

Hacımusa, Bıçkıcı ve Delice Dereleri tarafından getirilen alüvyonlar ovanın oluşumunda etkili olmuştur. Ovanın özellikle kıyı kısımları, Kuvaterner Buzullaşması sonrası deniz seviyesinin ani yükselmesi sonucu alüvyonlarla doldurulmaya başlamıştır. Ovadaki akarsuların beslenme alanı yaklaşık 719 km^2 dir. Gazipaşa Kıyı Ovası'nda arazi üç farklı şekilde kullanılmaktadır; bunlar sera, narenciye ve açık tarım arazileridir. Bu bölge tarıma elverişlidir.11.85 km^2 alanda seracılık yapılmaktadır. Sera sebzeleri ve muz yetiştirilmektedir. İlçe, Türkiye'nin muz üretimi ihtiyacının üçte birini karşılamaktadır. Ayrıca ova içinde 1,45 km^2 bir alanda portakal yetiştirilmektedir. Yaklaşık 9 km^2 alan açık tarım arazisi olarak kullanılıyor. Ova içindeki engebeli sahalarda tarım yapılmamaktadır (HÜBAPKB, 2026). .

BÖLGESEL JEOLOJİK ÖZELLİKLER

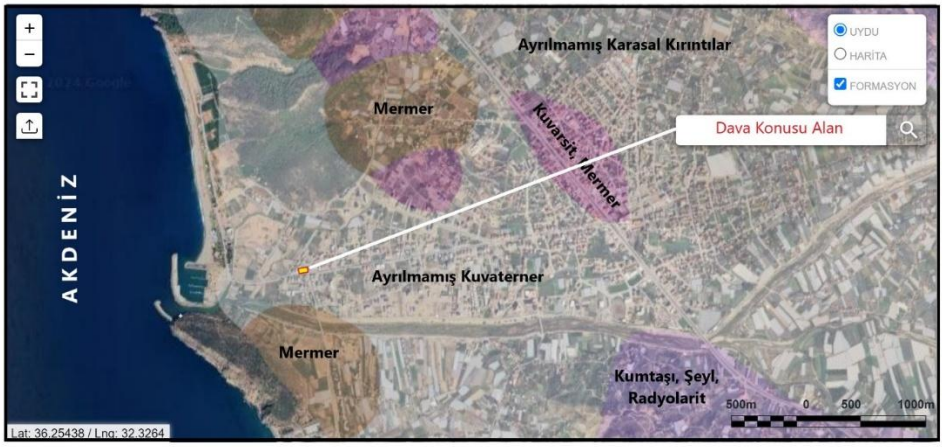
Gazipaşa ilçesi ve etrafındaki bölgenin jeolojik yapısını anlamak için bilimsel araştırmalar ve MTA (2016) verileri kullanılmıştır. Jeolojik olarak, Gazipaşa ve çevresi Antalya ve Alanya birliklerinin stratigrafik ve metamorfik özellikleri ile tanımlanır. Bu bölgede bulunan kayaçlar ve yapısal unsurlar, bu bölgeleri birbirinden ayırt etmek için önemli rol oynar (Özgül, 1976). Alanya Birliği; Antalya Birliğinin üzerine sıkışma tektoniği sonucu önce güneyden kuzeye doğru hareket etmiş, sonrasında Eosen-Miyosen dönemlerinde ikinci kez sıkışma olayı sonucu Hadim Napı birimleri kuzeyden güneye doğru hareket ederek şu anki konumlarını almışlardır (Özgül, 1976). Gazipaşa Kıyı Ovası ve etrafında Akdeniz'den kuzeye doğru birçok jeolojik yapı dikkat çeker. Bunlar genel olarak Kuvaterner alüvyonu, Triyas dönemine ait kırıntılı kayaçlar, Paleozoyik dönemi temsil eden kireçtaşları ve Kambriyen dönemi şistleri ve mermerleri içerir (Keleş 1996). Şistlerin üzerinde bulunan kireçtaşları kıvrımlı ve tabakalıdır. Şistler ve kireçtaşları arasında taban konglomerası gözlemlenebilmektedir. Literatür verilerine göre, orta kalınlıkta tabakalanmış olan bu birimin kalınlığının 400 metreye ulaşması tahmin edilmektedir(Özgül, 1976). Kireçtaşları gri ve siyah renklerde, sık dokulu, kırılgan ve karstik yapılı taşlardır. Kuvaterner dönemi yaşlı alüvyonlar, akarsuların getirdiği malzemelerle oluşan vadilerde ve bu akarsuların tabanında görülebilir. Gazipaşa Kıyı Ovası ve etrafındaki jeolojik yapıların temel stratigrafik özellikleri, MTA (2016) raporlarından toplanarak aşağıdaki şekilde özetlenmiştir. İçinde bulunduğu bölgeye göre Antalya ve Alanya Birliği adında iki farklı jeolojik birlik vardır. Antalya Birliği, kendi içinde Çataltepe Napı (Gazipaşa Birimi), Alakırçay Napı (Alakırçay Birimi) ve Tahtalıdağ Napı (Gündoğmuş-Katrandağı Birimleri) adlı üç bölgeye ayrılmıştır (Özgül, 1976). Alanya Birliği, Mahmutlar, Sugözü ve Yumrudağ Birimi olmak üzere üç parçaya ayrılmıştır. Gazipaşa Ovası ve etrafındaki jeolojik yapılar Çataltepe Napı (Gazipaşa Birimi) ve Yumrudağ Birimi içinde yer alır. Gazipaşa yerleşim bölgesi ve etrafının jeoloji haritası Şekil 9 'da yer almaktadır.



Şekil 9. Gazipaşa yerleşim alanı ve civarının Jeoloji haritası(Bozan vd., 2019).

KIYI ALANININ JEOLOJİSİ

Kıyı alanına en yakın mostra olarak görülebilen Evliya tepe kuvarsit/kireçtaşları gri-siyah renkli, sık dokulu, kırılgan ve karstik yapıdadır (Şekil 10-11).



Şekil 10. Kıyı alanı Genel Jeoloji Haritası (yerbilimleri.MTA)



Şekil 11. Evliya tepe kuvarsit/kireçtaşları

BÖLGENİN TEKTONİK ÖZELLİKLERİ

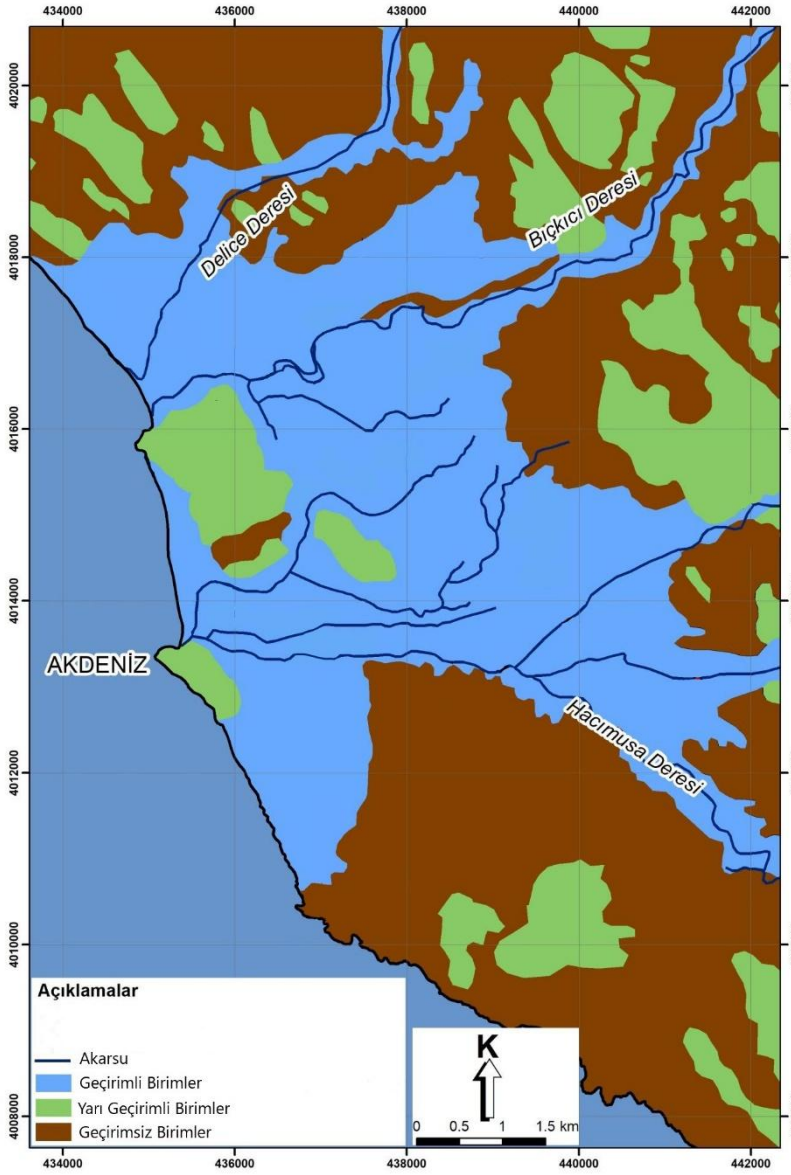
Bölge, Alpin dönemi orojenez fazlarının etkisi altındadır. Orojenez fazlarının etkisi sonucunda yapının çok kırık ve makaslanma içeren bir yapıya dönüştüğü görülmüştür. Belirgin şekilde görünen ters faylar ve naplar genellikle KB-GD yönünde uzanır. Antalya Birliği, Üst Kampaniyen-Maestrihtiyen bölgesinde okyanusal kabuk, kıtasal kabuğun üzerine bindiğinde oluşan alloktonik kütlerdir.

Antalya Birliği'ne benzer şekilde, aynı dönemde metamorfik değişiklere uğrayan Alanya Birliği de bulunmaktadır. Alanya Birliği, olası Maestrihtiyen'de Antalya Birliği'ni tektonik olarak üzerlemiştir. Gazipaşa ilçesi ve çevresindeki tektonik olaylar, Üst Kretase dönemine ait bindirmelerle başlamıştır. Daha sonra Alpin Orojenezi'nin farklı aşamalarında çeşitli yönlerdeki kuvvetler, farklı karakterlerdeki fayların oluşmasına neden olmuştur.

BÖLGENİN HİDROJEOLOJİK ÖZELLİKLERİ

Gazipaşa Ovası'nın kuzey ve kuzeydoğu yönlerinden akan Delice, Bıçkıcı ve Hacımusa dereleri, Akdeniz'e dökülür. Delice Deresi'nin drenaj alanı 135 km^2, Bıçkıcı Deresi'nin drenaj alanı 158 km^2 ve Hacımusa Deresi'nin drenaj alanı 426 km^2 dir. Arazi çalışması sırasında yapılan gözlemlere göre, derelerin su akıttığı dönemlerde akarsudaki su sulama kanalına yönlendirilmektedir. Ova genelinde, özellikle akarsuların çevrelerinde inşa edilen sulama kanalları, alüvyon akiferinden gelen suyu kullanarak sulama suyu ihtiyacını karşılamakta. İnceğiz ve Gökçeler akım gözlem istasyonlarında (AGİ) Delice ve Bıçkıcı dereleri üzerinde yapılan gözlemler sonucunda, yıllık ortalama akımlar sırasıyla 4.09 m^3/s ve 2.26 m^3/s olarak DSİ (1972) tarafından bulunmuştur. Mağara kaynağı olarak bilinen kaynak, Bıçkıcı Deresi'nin Akdeniz'e döküldüğü noktadan karstik yapıya sahip bir mağaradan çıkıyor. Kaynağın debisi yaklaşık 16 l/s'dir. Gazipaşa ve çevresindeki yüzeydeki kayalar, Kuvaterner alüvyonu, Paleozoyik kireçtaşları ve Kambriyen mermerleri gibi farklı birimler olarak gruplanabilir ve her biri farklı su değerlerine sahiptir (HÜBAPKB, 2026). Bu birimlerin yeraltındaki suyun taşınması ve yayılmasıyla ilgili özellikleri oldukça farklıdır. Alüvyonun çakıl ve kum tane boyutlarına sahip olması nedeniyle birincil gözeneklilik yüksekken, Paleozoyik kireçtaşları ve Kambriyen mermerlerin kırıklı ve çatlaklı yapısı nedeniyle ikincil gözeneklilik de yüksektir. Litolojik birimler, hidrojeolojik özelliklerine göre şu şekilde ayrılmıştır ve Şekil 12 'de gösterilmiştir. Geçirimli birimler olarak; Gazipaşa Kıyı Ovası'nda yeraltısuyunu taşıyan ve ileten alüvyon, kireçtaşı ve mermerlerdir. Alüvyon akarsu yataklarında bulunur ve birinci dereceden yüksek gözeneklilik ve geçirimlilik özellikleri vardır. Delice, Bıçkıcı ve Hacımusa nehirleri yaklaşık 38 km karelik bir alanda alüvyon biriktirmiştir. Ovada açılan kuyu verilerine göre elde edilen bilgiler, alüvyon tabakasının kalınlığının en fazla 60 metre olduğunu göstermektedir (Bozan, 2018) . Alüvyonlarda açılmış kuyularda bazı yerlerde yeraltı su seviyeleri geçilmektedir. Birim kum ve çakıl seviyelerinde yeraltı suyunu taşıyan kum ve çakıl malzemelerinden oluşur. Alüvyon akiferinin su iletimi, tane boyu büyüklüğüne göre değişmektedir. Bıçkıcı Deresi yatağında iletimlilik katsayısı 608-1.777 m^2/gün olarak belirlenirken, Hacımusa Deresi yatağındaki kuyularda bu değer 3.200-4.164 m^2/gün arasında bulunmuştur (Bozan, 2018). Alüvyon akiferinde açılmış kuyuların özgül debileri 9.3 ile 32.5 litre/saniye/metre arasında değişmektedir. Alüvyon akiferi, yağış ve kireçtaşı ile mermerlerden yan yana veya altında gelen su ile beslenir. Alüvyon akiferinden su boşalırsa, bu

kuyulardan çekim, buharlaşma ve terleme ile olur ve Akdeniz'e akar (HÜBAPKB, 2026).

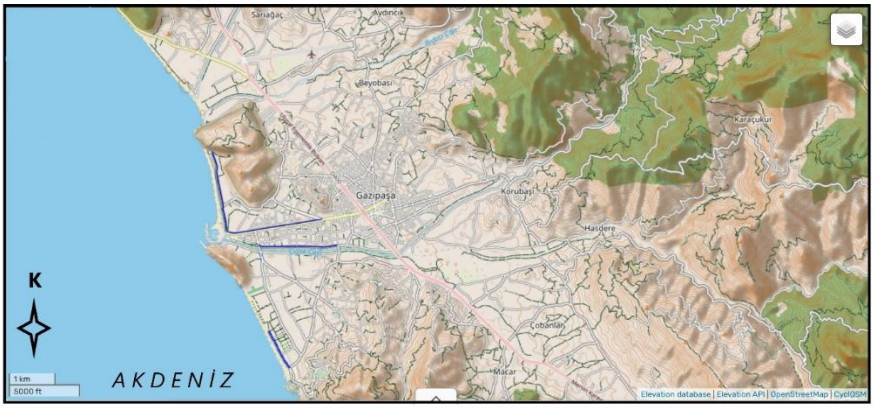


Şekil 12. Bölgenin Hidrojeoloji Haritası (Bozan vd., 2019).

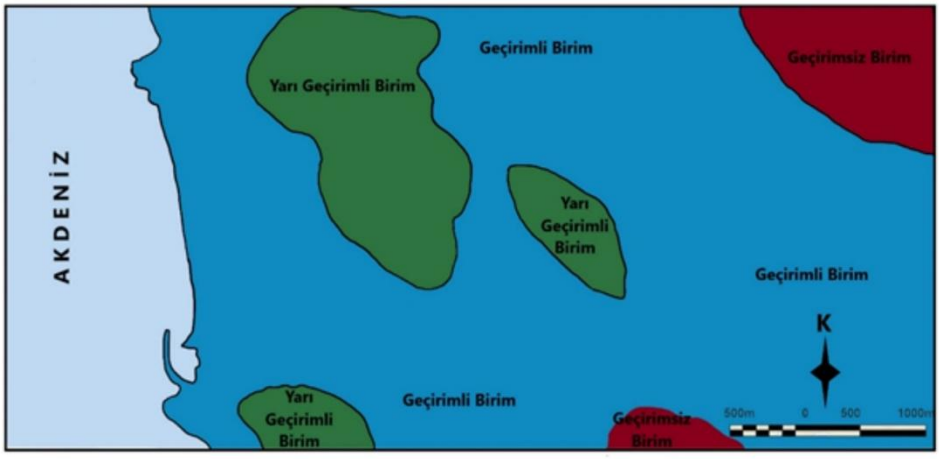
KIYI ALANININ HİDROJEOLOJİSİ

Kıyı alanının topografyası Şekil 13' de verilmiştir. Gazipaşa ovasında yeraltı suyu seviyesi ortalama 80 metre civarındadır. Kıyı zonuna yaklaştıkça bu oran azalmaktadır. Günümüzde ovada tarımsal amaçlı yeraltı suyu kullanılmamaktadır. Tuzlu-tatlı su girişimi kıyıdan itibaren kendini göstermektedir. Bundan dolayı, Gazipaşa ovasında tarımda yüzey suyu

kullanılmaktadır. Gazipaşa ovası kıyı alanı için yapılan değerlendirmeler sonucu hazırlanan Hidrojeoloji Haritasında Kuvaterner alüvyon 'Geçirimli Birim' olarak, Paleozoyik kireçtaşları ve Kambriyen mermerler ise 'Yarı Geçirimli Birim' olarak tanımlanmıştır. Kumtaşı, Şeyl ve radiyolarit 'Geçirimsiz Birim' olarak ayırtlanmıştır. Değerlendirmeler sonucunda çalışma alanına ait hazırlanan 'Hidrojeoloji Haritası' Şekil 14' de görülmektedir.



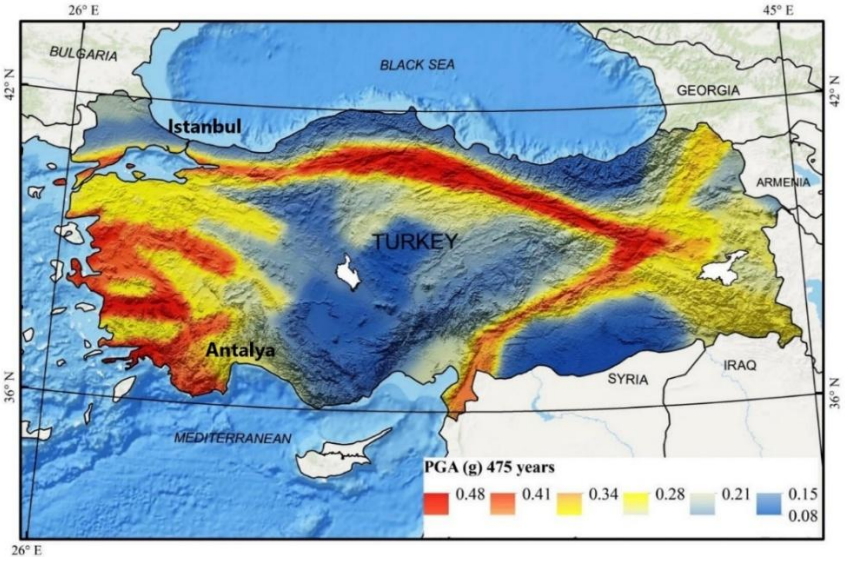
Şekil 13. Kıyı alanının Topografyası



Şekil 14. Kıyı alanının Hidrojeoloji Haritası

BÖLGENİN DEPREMSELLİĞİ

Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası" verilerine göre Gazipaşa yerleşim alanı 4. Derece Deprem Bölgesinde yer almaktadır. Bu bölgeler için "Etkin Yer İvmesi Katsayısı A0=0,28 olarak " verilmektedir (Şekil 15).



Şekil 15. "Türkiye Deprem Tehlike Haritası" na göre bölgenin depremselliği (AFAD, 2019)

SONUÇLAR

Gazipaşa Kıyı Ovası hidrojeolojik açıdan ovayı oluşturan Kuvarterner alüvyon ve ovayı çevreleyen Paleozoyik kireçtaşları ve Kambriyen mermerlerden oluşmaktadır. Gözeneklilik ve iletimlilik özelliklerine göre Kuvaterner alüvyon 'Geçirimli Birim', Paleozoyik kireçtaşları ve Kambriyen mermerler 'Yarı Geçirimli Birim' olarak tanımlanmıştır. Kumtaşı, Şeyl ve radiyolarit 'Geçirimsiz Birim' olarak ayırtlanmıştır. Ovadaki yeraltı suyu beslenimi ovaya düşen yağıştan ve yanal/alttan olarak besleyen kireçtaşı/mermer akiferden sağlanmaktadır. Ovada yeraltı suyu akımı denize doğrudur.

Tuzlu su girişini meydana geldiği yerde kontrol etmek ve tersine çevirmek ve başka alanlarda oluşmasını önlemek için çok çeşitli geleneksel ve yenilikçi izleme ve yönetim yaklaşımları kullanılmaktadır. Gelecekte, tuzlu su izinsiz girişini izlemek ve modellemek için yeni araçlar geliştirilecek ve izinsiz girişi daha verimli bir şekilde yönetmek için yeni yaklaşımlar muhtemelen uygulanacaktır. Arıtma yöntemleri daha enerji verimli hale geldikçe ve çevreye duyarlı tuzlu su bertarafının zorlukları ele alındıkça tuzdan arındırmanın daha yaygın hale gelmesi bekleniyor. Son olarak, su yöneticilerinin, iklim değişikliği nedeniyle deniz seviyesindeki potansiyel artışlardan tuzlu su girişinin nasıl etkilenebileceğini düşünmeleri gerekecektir.Yapılan tüm kümülatif değerlendirmeler sonucunda kıyı zonunun tatlı-tuzlu su girişiminden etkilenmesi söz konusudur. Bu nedenle ovadan tarımsal amaçlı sulama için fazla su çekimine yönelik tedbirler alınmalıdır.

REFERANSLAR

AFAD, 2019. Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası

Bozan Ç. 2018. Gazipaşa (Antalya) Kıyı Ovasının Hidrojeolojik İncelemesi. Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü Yüksek Lisans Tezi, 131 s.

Bozan Ç, Avcı P, Özyurt NN, Bayarı CS, 2019. Gazipaşa (Antalya) kıyı akiferinin hidrojeolojik kavramsal modeli, Hydrogeological conceptual model of Gazipaşa coastal aquifer (Antalya). Pamukkale Üniv Müh Bilim Derg, 25(3), 352-363. doi: 10.5505/pajes.2018.58855

Devlet Su işleri. 1972. "Gazipaşa Ovası Hidrojeolojik Etüt Raporu". Ankara, Türkiye, 49 s.

Erbay G. 1998. Demirtaş-Gazipaşa Civarının Jeolojik, Mineralojik ve Petrografik Özellikleri. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye.

Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (HÜBAPKB). 2026. "FHD-2015-9161 Gazipaşa (Antalya) Kıyı Ovasının Hidrojeolojik İncelenmesi". Ankara, Türkiye, 77 s.

Keleş A. 1996. Gazipaşa (Antalya) Ovası Hidrojeoloji İncelemesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye.

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. 2016. "1/100000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi No: 223, Alanya-P28 Paftası". Ankara, Türkiye, 19 s.

Özgül N, 1976. Toroslar′ın bazı temel jeoloji özellikleri. Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, 19(1), 65-78. www.yerbilimleri.mta.gov.tr

BÖLÜM 5

IoT Tabanlı Akıllı Otomasyon Sistemlerinde Yapay Zekâ ve Siber Güvenlik Yaklaşımları

Salih Erdurucan[1]
İzzet Yavuz[2]

[1] Ankara Üniversitesi Nallıhan MYO / Bilgisayar Programcılığı
ORCID: 0000-0002-1061-7712
[2] Ankara Üniversitesi Nallıhan MYO / Elektrik Enerjisi Üretim İletim Ve Dağıtımı Programı, ORCID: 0000-0002-2309-3815

1. Giriş

Dijital dönüşüm sürecinin hızlanmasıyla birlikte fiziksel sistemlerin algılama, iletişim kurma ve otonom karar verebilme yetenekleri kazanması, modern bilgisayar mühendisliği araştırmalarının temel çalışma alanlarından biri hâline gelmiştir. Bu dönüşümün merkezinde yer alan Nesnelerin İnterneti (Internet of Things - IoT) teknolojisi; sensörler, gömülü sistemler, haberleşme altyapıları ve veri işleme platformlarının bütünleşmesiyle fiziksel nesnelerin dijital ağlara bağlanmasını sağlayan bir paradigma olarak ortaya çıkmıştır. IoT sistemleri, yalnızca cihazların internete bağlanmasını değil, aynı zamanda çevresel verilerin sürekli olarak toplanmasını, analiz edilmesini ve belirli koşullara göre otomatik aksiyonların gerçekleştirilmesini mümkün kılmaktadır (Atzori, Iera, & Morabito, 2010).

IoT kavramı ilk olarak fiziksel nesnelerin benzersiz şekilde tanımlanabilmesi ve birbirleriyle iletişim kurabilmesi fikri üzerine kurulmuş olsa da günümüzde bu yaklaşım çok daha kapsamlı bir yapıya dönüşmüştür. Modern IoT sistemleri; algılama, veri aktarımı, veri analizi ve karar verme süreçlerini kapsayan çok katmanlı mimariler olarak değerlendirilmektedir. Özellikle endüstriyel otomasyon, akıllı üretim, enerji yönetimi, sağlık teknolojileri ve akıllı şehir uygulamalarında IoT tabanlı sistemler kritik görevler üstlenmektedir. IoT teknolojisinin temel amacı, fiziksel dünyadan elde edilen verilerin anlamlandırılarak daha etkin, hızlı ve otomatik karar süreçlerinin oluşturulmasıdır (Gubbi vd., 2013).

Geleneksel otomasyon sistemlerinde karar verme süreçleri çoğunlukla önceden tanımlanmış kurallar ve deterministik kontrol algoritmaları ile gerçekleştirilmektedir. Ancak günümüzde üretim süreçlerinin karmaşıklaşması, gerçek zamanlı veri miktarının artması ve değişken çevresel koşullar, klasik kontrol yöntemlerinin yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Bu noktada yapay zekâ (Artificial Intelligence - AI) tekniklerinin IoT sistemleriyle bütünleşmesi, daha esnek ve öğrenebilir otomasyon çözümlerinin geliştirilmesini sağlamıştır. Literatürde Yapay Zekâ Destekli Nesnelerin İnterneti (Artificial Intelligence of Things - AIoT) olarak ifade edilen bu yaklaşım, IoT altyapılarından elde edilen büyük veri kümelerinin makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmaları aracılığıyla analiz edilmesini ve otonom karar mekanizmalarının oluşturulmasını amaçlamaktadır (Aouedi vd., 2024).

Yapay zekâ destekli IoT sistemleri özellikle Endüstri 4.0 uygulamalarında önemli bir rol üstlenmektedir. Akıllı fabrikalar, robotik sistemler, kestirimci bakım uygulamaları ve siber-fiziksel sistemler; sensörlerden elde edilen verilerin sürekli analiz edilmesini ve üretim süreçlerinin dinamik olarak optimize edilmesini gerektirmektedir. Örneğin bir üretim hattında bulunan titreşim sensörlerinden elde edilen verilerin makine öğrenmesi algoritmalarıyla analiz

edilmesi sayesinde ekipman arızaları meydana gelmeden önce tahmin edilebilmekte ve bakım süreçleri planlanabilmektedir.

Bununla birlikte IoT tabanlı akıllı otomasyon sistemlerinin yaygınlaşması, beraberinde önemli güvenlik sorunlarını da getirmiştir. Geleneksel bilgisayar sistemlerinden farklı olarak IoT cihazları genellikle düşük işlem kapasitesine sahip, uzun süre çalışan ve geniş ağlara bağlı cihazlardan oluşmaktadır. Bu durum, saldırganlar açısından daha geniş bir saldırı yüzeyi meydana getirmektedir. IoT cihazlarının yetersiz kimlik doğrulama mekanizmaları, güncelleme problemleri, sınırlı kaynakları ve heterojen yapıları önemli güvenlik açıkları oluşturmaktadır (Al-Garadi vd., 2018).

Özellikle endüstriyel IoT (Industrial Internet of Things - IIoT) sistemlerinde güvenlik konusu kritik bir öneme sahiptir. Üretim tesislerinde kullanılan IoT tabanlı kontrol sistemlerine yönelik gerçekleştirilebilecek siber saldırılar yalnızca veri kaybına değil, fiziksel süreçlerin bozulmasına ve ciddi operasyonel risklere neden olabilmektedir. Bu nedenle IoT güvenliği, yalnızca ağ güvenliği kapsamında değil; cihaz güvenliği, veri gizliliği, erişim kontrolü ve güvenilir yapay zekâ modelleri açısından bütüncül şekilde ele alınmalıdır.

Son yıllarda yapay zekâ yöntemleri yalnızca karar verme süreçlerinde değil, aynı zamanda IoT güvenliğinin geliştirilmesinde de kullanılmaktadır. Makine öğrenmesi tabanlı saldırı tespit sistemleri, anomali algılama yöntemleri ve davranış analizi yaklaşımları, geleneksel güvenlik çözümlerinin yetersiz kaldığı dinamik ortamlarda etkili çözümler sunmaktadır (Tahsien, Karimipour, & Spachos, 2020).

Bu bölümde IoT tabanlı akıllı otomasyon sistemlerinin temel yapısı incelenmekte, yapay zekâ destekli karar mekanizmalarının çalışma prensipleri açıklanmakta ve bu sistemlerin güvenliğinin sağlanmasına yönelik güncel siber güvenlik yaklaşımları kapsamlı şekilde değerlendirilmektedir.

2. Nesnelerin İnterneti (IoT) Teknolojisinin Temelleri

2.1. IoT Kavramı ve Gelişim Süreci

Nesnelerin İnterneti kavramı, fiziksel nesnelerin çeşitli algılayıcılar ve iletişim teknolojileri aracılığıyla dijital sistemlere bağlanmasını ifade etmektedir. IoT ortamında sensörlerle donatılmış cihazlar çevreden veri toplamakta, elde edilen verileri ağ altyapıları üzerinden diğer cihazlara veya merkezi sistemlere aktarmakta ve belirlenen kurallar doğrultusunda çeşitli işlemler gerçekleştirmektedir.

Atzori vd. (2010), IoT kavramını üç temel perspektif üzerinden değerlendirmiştir:

1. **Nesne merkezli yaklaşım:** Fiziksel nesnelerin benzersiz şekilde tanımlanması ve birbirleriyle iletişim kurması.

2. **İnternet merkezli yaklaşım:** Nesnelerin internet protokolleri aracılığıyla birbirine bağlanması.
3. **Semantik merkezli yaklaşım:** Elde edilen verilerin anlamlandırılması ve bilgiye dönüştürülmesi.

Bu üç yaklaşımın birleşimi, günümüzdeki akıllı IoT ekosistemlerinin temelini oluşturmaktadır.

IoT teknolojilerinin gelişiminde RFID (Radio Frequency Identification), kablosuz sensör ağları, düşük güç tüketimli haberleşme teknolojileri ve bulut bilişim altyapıları önemli rol oynamıştır. İlk dönem IoT uygulamaları ağırlıklı olarak nesne takibi ve uzaktan izleme amacıyla kullanılırken, günümüzde yapay zekâ destekli sistemler sayesinde IoT cihazları çevresel koşulları analiz edebilen ve bağımsız kararlar verebilen akıllı sistemlere dönüşmektedir.

2.2. IoT Sistemlerinin Temel Bileşenleri

Bir IoT sistemi genel olarak dört temel bileşenden meydana gelmektedir:

2.2.1. Algılama Katmanı

Algılama katmanı, fiziksel ortamdan veri toplayan sensör ve cihazlardan oluşmaktadır. Bu katmanda sıcaklık, nem, basınç, titreşim, görüntü, konum ve hareket gibi farklı veri türleri elde edilmektedir.

Endüstriyel otomasyon sistemlerinde kullanılan sensörler özellikle:

- Makine titreşimleri,
- Motor sıcaklıkları,
- Enerji tüketimleri,
- Üretim hızları

gibi kritik operasyonel verileri toplamaktadır.

2.2.2. Ağ ve Haberleşme Katmanı

Bu katman, sensörlerden elde edilen verilerin farklı cihazlar ve platformlar arasında aktarılmasını sağlamaktadır.

IoT sistemlerinde yaygın kullanılan haberleşme teknolojileri:

- MQTT
- CoAP
- ZigBee
- Bluetooth Low Energy
- LoRaWAN

- 5G

olarak sıralanabilir.

Bu protokollerin seçimi; veri aktarım hızı, enerji tüketimi, gecikme süresi ve uygulama gereksinimlerine bağlı olarak değişmektedir.

2.2.3. Veri İşleme Katmanı

IoT sistemlerinde milyarlarca cihazdan sürekli olarak veri üretilmesi, gelişmiş veri işleme yöntemlerine ihtiyaç doğurmaktadır. Geleneksel bulut tabanlı yaklaşımların yanında son yıllarda **Edge Computing** ve **Fog Computing** mimarileri yaygınlaşmıştır.

Edge Computing yaklaşımı, verilerin kaynağa yakın noktada işlenmesini sağlayarak gecikmeyi azaltmakta ve gerçek zamanlı karar mekanizmalarının uygulanmasına olanak vermektedir.

2.2.4. Uygulama Katmanı

Bu katman, IoT sistemlerinden elde edilen bilgilerin kullanıcıya veya kontrol sistemlerine sunulduğu bölümdür.

Örnek uygulamalar:

- Akıllı fabrika yönetimi
- Akıllı enerji sistemleri
- Sağlık takip sistemleri
- Akıllı şehir uygulamaları

olarak gösterilebilir.

3. IoT Tabanlı Akıllı Otomasyon Sistemlerinde Yapay Zekâ Entegrasyonu

3.1. Yapay Zekâ ve Nesnelerin İnterneti Birleşimi: AIoT Yaklaşımı

Nesnelerin İnterneti teknolojisinin yaygınlaşmasıyla birlikte fiziksel ortamdan toplanan veri miktarı önemli ölçüde artmıştır. Sensör teknolojilerindeki gelişmeler, düşük maliyetli gömülü sistemlerin yaygınlaşması ve yüksek hızlı haberleşme altyapılarının gelişmesi sonucunda IoT sistemleri çok büyük hacimli ve sürekli veri üreten platformlara dönüşmüştür. Ancak yalnızca veri toplamak, modern otomasyon sistemlerinin ihtiyaç duyduğu akıllı karar verme süreçleri için yeterli değildir. Bu noktada yapay zekâ teknolojileri, IoT sistemlerinden elde edilen verilerin analiz edilmesi, anlamlandırılması ve otomatik karar mekanizmalarına dönüştürülmesinde kritik bir rol üstlenmektedir.

IoT ve yapay zekânın birleşimi literatürde Artificial Intelligence of Things (AIoT) olarak tanımlanmaktadır. AIoT, IoT altyapılarının sağladığı gerçek

zamanlı veri toplama yeteneği ile yapay zekâ algoritmalarının öğrenme ve karar verme kapasitesini bir araya getiren yeni nesil bir teknoloji yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda sensörlerden elde edilen veriler yalnızca depolanmakta değil; makine öğrenmesi, derin öğrenme ve optimizasyon algoritmaları aracılığıyla analiz edilerek sistem davranışlarının iyileştirilmesi sağlanmaktadır (Xu vd., 2021).

AIoT sistemleri klasik IoT mimarilerinden farklı olarak üç temel yetenek kazandırmaktadır:

1. **Algılama (Sensing):** Fiziksel ortamdan gerçek zamanlı veri toplama.
2. **Öğrenme (Learning):** Toplanan verilerden anlamlı modeller oluşturma.
3. **Karar Verme (Decision Making):** Öğrenilen modeller doğrultusunda otomatik aksiyon oluşturma.

Bu özellikler sayesinde AIoT sistemleri, yalnızca mevcut durumları izleyen pasif sistemlerden, gelecekteki durumları tahmin edebilen ve kendi davranışlarını optimize edebilen aktif sistemlere dönüşmektedir.

Xu vd. (2018), yapay zekâ ve IoT entegrasyonunun özellikle akıllı üretim, sağlık, ulaşım ve enerji sistemlerinde önemli dönüşümler oluşturduğunu belirtmektedir. Araştırmacılara göre AIoT sistemleri, büyük veri analitiği ve yapay zekâ modelleri sayesinde geleneksel otomasyon sistemlerinin sınırlarını aşarak daha otonom ve adaptif çözümler sunmaktadır.

3.2. IoT Sistemlerinde Makine Öğrenmesi Tabanlı Karar Mekanizmaları

Makine öğrenmesi (Machine Learning - ML), bilgisayar sistemlerinin açık şekilde programlanmadan veri üzerinden öğrenmesini sağlayan yapay zekâ alt alanlarından biridir. IoT tabanlı otomasyon sistemlerinde makine öğrenmesi algoritmaları; sınıflandırma, tahminleme, anomali tespiti ve optimizasyon gibi birçok görev için kullanılmaktadır.

IoT ortamlarında makine öğrenmesi süreci genel olarak aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır:

1. Veri toplama
2. Veri ön işleme
3. Özellik çıkarımı
4. Model eğitimi
5. Karar üretimi
6. Sistem optimizasyonu

IoT cihazlarından elde edilen ham veriler genellikle gürültülü, eksik veya yüksek boyutlu olabilir. Bu nedenle yapay zekâ modellerinin başarılı

çalışabilmesi için veri temizleme ve özellik seçimi süreçleri büyük önem taşımaktadır.

3.2.1. Denetimli Öğrenme Yaklaşımları

Denetimli öğrenme algoritmalarında model, daha önce etiketlenmiş veri kümeleri kullanılarak eğitilmektedir. IoT tabanlı otomasyon sistemlerinde özellikle aşağıdaki uygulamalarda kullanılmaktadır:

- Arıza sınıflandırma
- Üretim kalite kontrolü
- Sensör verisi analizi
- Siber saldırı tespiti

Yaygın kullanılan algoritmalar:

- Karar ağaçları
- Rastgele orman algoritması
- Destek vektör makineleri
- Yapay sinir ağları

Örneğin endüstriyel IoT sistemlerinde makine sensörlerinden alınan titreşim ve sıcaklık verileri kullanılarak makine arızalarının önceden sınıflandırılması mümkün olmaktadır. Bu yaklaşım, kestirimci bakım uygulamalarının temelini oluşturmaktadır.

3.2.2. Denetimsiz Öğrenme Yaklaşımları

Denetimsiz öğrenme yöntemlerinde sistem herhangi bir etiket bilgisi olmadan veri içerisindeki yapıları keşfetmektedir.

IoT sistemlerinde özellikle:

- Anomali tespiti,
- Olağan dışı davranış analizi,
- Kullanıcı davranışı modelleme

amaçlarıyla kullanılmaktadır.

Örneğin bir üretim tesisindeki sensörlerden gelen veriler sürekli analiz edilerek normal çalışma koşullarından farklı davranışlar tespit edilebilir. Böylece sistem, henüz ciddi bir arıza oluşmadan önce uyarı verebilir.

3.3. Derin Öğrenme Yaklaşımları ve IoT Otomasyonu

Derin öğrenme (Deep Learning), çok katmanlı yapay sinir ağları kullanarak karmaşık veri örüntülerini öğrenebilen gelişmiş bir makine öğrenmesi yaklaşımıdır. Özellikle görüntü, zaman serisi ve büyük ölçekli sensör verilerinin analizinde başarılı sonuçlar vermektedir.

IoT tabanlı otomasyon sistemlerinde derin öğrenme yöntemleri şu alanlarda kullanılmaktadır:

- Görüntü tabanlı kalite kontrol
- Robotik sistemler
- Akıllı güvenlik sistemleri
- Trafik yönetimi
- Enerji optimizasyonu

3.3.1. Evrişimsel Sinir Ağları (CNN)

Convolutional Neural Network (CNN) modelleri özellikle görüntü işleme uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Akıllı fabrikalarda kameralar ve sensörlerden alınan görüntüler CNN modelleri ile analiz edilerek:

- Ürün hatalarının belirlenmesi,
- Nesne tanıma,
- Robot yönlendirme

işlemleri gerçekleştirilmektedir.

3.3.2. Tekrarlayan Sinir Ağları (RNN) ve LSTM Modelleri

IoT sistemlerinde zaman serisi verileri önemli bir yere sahiptir. Sensör verileri genellikle zamana bağlı değişim gösterdiği için klasik makine öğrenmesi yöntemleri bazı durumlarda yetersiz kalabilmektedir. RNN ve özellikle Long Short-Term Memory (LSTM) modelleri:

- Enerji tüketim tahmini,
- Makine arıza tahmini,
- Trafik yoğunluğu tahmini

gibi zaman bağımlı problemlerde kullanılmaktadır.

Zaman serisi verilerindeki uzun dönemli ilişkileri öğrenebilme yeteneği nedeniyle LSTM modelleri IoT tabanlı kestirimci bakım uygulamalarında yaygın şekilde tercih edilmektedir (Zhang vd., 2018).

3.4. Edge AI, TinyML ve Gerçek Zamanlı Karar Mekanizmaları

IoT sistemlerinde geleneksel yaklaşımda sensörlerden elde edilen veriler merkezi bulut sistemlerine gönderilmekte ve analiz işlemleri burada gerçekleştirilmektedir. Ancak gerçek zamanlı uygulamalarda yüksek gecikme süreleri, ağ bant genişliği gereksinimi ve veri gizliliği sorunları nedeniyle yalnızca bulut tabanlı mimariler yeterli olmamaktadır.

Bu nedenle son yıllarda Edge AI yaklaşımı önem kazanmıştır. Edge AI, yapay zekâ modellerinin merkezi bulut yerine veri kaynağına yakın uç cihazlarda çalıştırılması anlamına gelmektedir. Bu bağlamda, elektrik-elektronik mühendisliği ve bilgisayar bilimlerinin ortak kesişim kümesinde yer alan TinyML (Küçük Makine Öğrenmesi) teknolojisi; ARM Cortex-M serisi mikrodenetleyiciler ve ESP32 gibi sınırlı bellek, düşük işlem gücü ve katı güç tüketimi kısıtlarına sahip gömülü donanımlar üzerinde hafifletilmiş sinir ağlarının çalıştırılabilmesini sağlamaktadır. Bu yaklaşımın temel avantajları; daha düşük gecikme süresi, daha hızlı karar verme, daha az ağ kullanımı, donanım seviyesinde optimize edilmiş enerji verimliliği ve daha yüksek veri gizliliği olarak sıralanabilir.

Örneğin bir üretim hattında çalışan robot sisteminin saniyeler içerisinde karar vermesi gerektiğinde, sensör verisinin önce uzak bir bulut sistemine gönderilmesi yerine yerel gömülü donanım üzerinde analizi daha uygun olmaktadır.

Shi vd., (2016), uç bilişim yaklaşımının özellikle IoT sistemlerinde gecikmeyi azaltmak ve gerçek zamanlı uygulamaları desteklemek açısından önemli olduğunu belirtmiştir. Bununla birlikte, uç bilişim destekli IoT sistemlerinde artan veri akışı ve dağıtık mimari, beraberinde yeni güvenlik ve gizlilik zorluklarını getirmekte; bu durum uç cihazlar üzerinde kapsamlı koruma mekanizmalarının geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır (Alwarafy vd., 2021).

3.5. Endüstriyel IoT Sistemlerinde Yapay Zekâ Destekli Otomasyon Uygulamaları

Endüstriyel Nesnelerin İnterneti (Industrial Internet of Things - IIoT), üretim süreçlerinde kullanılan makinelerin, sensörlerin ve kontrol sistemlerinin birbirleriyle bağlantılı hâle getirilmesini ifade etmektedir.

IIoT sistemlerinde yapay zekâ aşağıdaki alanlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır:

3.5.1. Kestirimci Bakım

Kestirimci bakım, makinelerde oluşabilecek arızaların önceden tahmin edilmesini amaçlayan bir yaklaşımdır.

Geleneksel bakım yöntemlerinde:

- Periyodik bakım yapılır,

- Arıza sonrası müdahale edilir.

Kestirimci bakımda ise:

- Sensör verileri sürekli analiz edilir,
- Arıza belirtileri erken tespit edilir,
- Gereksiz bakım maliyetleri azaltılır.

Makine öğrenmesi algoritmaları, titreşim, sıcaklık ve enerji tüketimi gibi veriler üzerinden ekipman davranışlarını modelleyerek olası arızaları tahmin edebilmektedir.

3.5.2. Akıllı Üretim Sistemleri

Akıllı üretim sistemlerinde yapay zekâ destekli IoT çözümleri:

- Üretim optimizasyonu,
- Kalite kontrol,
- Kaynak yönetimi,
- Robot koordinasyonu

alanlarında kullanılmaktadır.

Bu sistemler sayesinde üretim süreçleri daha esnek ve verimli hâle getirilmektedir.

3.5.3. Otonom Robotik Sistemler

IoT bağlantılı robot sistemleri, çevresel verileri sensörler aracılığıyla algılayarak yapay zekâ algoritmaları ile karar verebilmektedir.

Özellikle:

- Depo otomasyonu,
- Lojistik robotları,
- Endüstriyel robot kolları

AIoT tabanlı karar mekanizmalarından yararlanmaktadır.

4. IoT Tabanlı Akıllı Otomasyon Sistemlerinde Siber Güvenlik Problemleri

4.1. IoT Sistemlerinde Siber Güvenlik Gereksinimi

Nesnelerin İnterneti tabanlı akıllı otomasyon sistemleri, fiziksel dünya ile dijital sistemler arasında doğrudan bağlantı sağlayarak önemli avantajlar sunmasına rağmen, sahip oldukları dağıtık mimari ve sürekli bağlantılı yapıları nedeniyle önemli siber güvenlik risklerini de beraberinde getirmektedir.

Geleneksel bilgi teknolojileri (Information Technology - IT) sistemlerinde güvenlik çoğunlukla sunucu, ağ ve kullanıcı erişimi çevresinde şekillenirken; IoT sistemlerinde milyarlarca heterojen cihazın, farklı haberleşme protokollerinin ve sınırlı kaynaklara sahip gömülü sistemlerin birlikte çalışması güvenlik problemlerini daha karmaşık hâle getirmektedir.

IoT cihazlarının büyük bölümünün düşük işlem gücüne, sınırlı hafıza kapasitesine ve düşük enerji tüketimi gereksinimine sahip olması, bu cihazlarda gelişmiş güvenlik mekanizmalarının uygulanmasını zorlaştırmaktadır. Ayrıca birçok IoT cihazı uzun yaşam döngüsüne sahip olduğundan, üretici desteğinin sona ermesi veya güvenlik güncellemelerinin düzenli olarak sağlanamaması önemli riskler oluşturmaktadır (Sicari vd., 2015).

Akıllı otomasyon sistemlerinde güvenlik yalnızca veri güvenliği ile sınırlı değildir. Özellikle endüstriyel IoT (IIoT) uygulamalarında siber saldırılar fiziksel süreçleri etkileyebilmektedir. Örneğin üretim hatları, enerji sistemleri veya kritik altyapılar üzerinde gerçekleştirilebilecek saldırılar; üretim kayıplarına, operasyonel kesintilere ve güvenlik ihlallerine neden olabilir. Bu nedenle IoT güvenliği; gizlilik (confidentiality), bütünlük (integrity), erişilebilirlik (availability) ve güvenilirlik (trustworthiness) ilkeleri çerçevesinde ele alınmalıdır.

4.2. IoT Sistemlerinin Güvenlik Mimarisi ve Saldırı Yüzeyi

IoT sistemleri çok katmanlı mimariye sahip olduğundan, her katmanda farklı güvenlik tehditleri ortaya çıkmaktadır. Literatürde yaygın olarak IoT güvenlik tehditleri üç temel katmanda incelenmektedir:

- Algılama katmanı güvenliği
- Ağ ve iletişim katmanı güvenliği
- Uygulama ve veri işleme katmanı güvenliği

4.2.1. Algılama Katmanı Güvenlik Problemleri

Algılama katmanı, IoT mimarisinin fiziksel dünyayla doğrudan etkileşim kuran bölümüdür. Sensörler ve aktüatörlerden oluşan bu katman, fiziksel erişime açık olması nedeniyle çeşitli saldırılara karşı savunmasızdır.

Başlıca tehditler:

Sensör Manipülasyonu

Saldırganların sensör verilerini değiştirmesi veya yanlış veri üretmesi, karar mekanizmalarının hatalı sonuçlar vermesine neden olabilir. Örneğin endüstriyel bir otomasyon sisteminde sıcaklık sensörlerinden gelen verilerin değiştirilmesi, üretim sürecinin yanlış yönetilmesine yol açabilir.

Fiziksel Müdahale

IoT cihazlarının fiziksel olarak ele geçirilmesi durumunda:

- Donanım değişiklikleri,
- Zararlı yazılım yükleme,
- Kimlik bilgilerinin ele geçirilmesi

gibi saldırılar gerçekleştirilebilir.

4.2.2. Ağ Katmanı Güvenlik Problemleri

IoT cihazları farklı iletişim protokolleri aracılığıyla birbirleriyle haberleşmektedir. Bu nedenle ağ katmanı, saldırganların en sık hedef aldığı bölümlerden biridir.

Yaygın ağ tabanlı saldırılar:

Dinleme Saldırıları (Eavesdropping)

Kablosuz iletişim ortamlarında aktarılan verilerin yetkisiz kişiler tarafından ele geçirilmesi durumudur.

Özellikle şifrelenmemiş IoT iletişimleri, hassas verilerin açığa çıkmasına neden olabilir.

Ortadaki Adam Saldırısı (Man-in-the-Middle - MitM)

Bu saldırı türünde saldırgan, iki haberleşen sistem arasına girerek iletişimi izler veya değiştirir.

IoT sistemlerinde MitM saldırıları:

- Sensör verilerinin değiştirilmesi,
- Kimlik bilgilerinin çalınması,
- Yanlış komutların gönderilmesi

gibi sonuçlara neden olabilir.

Dağıtık Hizmet Engelleme Saldırıları (DDoS)

IoT cihazlarının botnet ağlarına dönüştürülerek büyük ölçekli saldırılarda kullanılması son yıllarda önemli bir güvenlik problemi hâline gelmiştir.

Bunun en bilinen örneklerinden biri, çok sayıda IoT cihazının kullanıldığı **Mirai botnet saldırısıdır**. Mirai saldırısı, varsayılan kullanıcı adı ve şifreleri kullanan IoT cihazlarının ele geçirilmesiyle gerçekleştirilmiş ve büyük ölçekli internet kesintilerine neden olmuştur (Antonakakis vd., 2017).

4.3. IoT Sistemlerine Yönelik Temel Siber Saldırı Türleri

4.3.1. Kimlik Doğrulama Saldırıları

IoT cihazlarında zayıf parola kullanımı veya varsayılan kimlik bilgilerinin değiştirilmemesi, saldırganların cihazlara yetkisiz erişim sağlamasına neden olmaktadır.

Literatürde IoT güvenliğinin en temel problemlerinden biri, cihazların güvenilir şekilde kimlik doğrulamasının sağlanması olarak gösterilmektedir (Roman, Zhou, & Lopez, 2013).

Güçlü kimlik doğrulama yöntemleri:

- Çok faktörlü kimlik doğrulama,
- Dijital sertifikalar,
- Donanım tabanlı güvenlik modülleri,
- Kimlik yönetim sistemleri

olarak sıralanabilir.

4.3.2. Veri Gizliliği Problemleri

IoT sistemleri kullanıcı davranışları, konum bilgileri, sağlık verileri ve endüstriyel üretim bilgileri gibi hassas veriler toplayabilmektedir.

Bu nedenle veri gizliliği önemli bir araştırma alanıdır.

Karşılaşılan temel problemler:

- Verinin izinsiz toplanması,
- Veri aktarımı sırasında ele geçirilmesi,
- Merkezi veri depolama riskleri,
- Kullanıcı mahremiyetinin korunması

olarak ifade edilebilir.

4.3.3. Zararlı Yazılım ve Botnet Tehditleri

IoT cihazlarının düşük güvenlik seviyeleri, onları zararlı yazılım saldırıları için uygun hedefler hâline getirmektedir.

Botnet saldırılarında saldırganlar çok sayıda IoT cihazını ele geçirerek:

- DDoS saldırıları,
- Spam gönderimi,
- Veri hırsızlığı

gibi faaliyetlerde kullanabilmektedir.

Antonakakis ve arkadaşları (2017), Mirai botnet saldırısını analiz ederek IoT cihazlarında güvenlik yapılandırmalarının önemini ortaya koymuştur.

4.4. Endüstriyel IoT Sistemlerinde Güvenlik Sorunları

Endüstriyel IoT sistemleri, klasik IoT uygulamalarından farklı olarak fiziksel süreçleri doğrudan kontrol etmektedir. Bu nedenle güvenlik ihlallerinin etkisi daha yüksek olabilmektedir.

Endüstriyel IoT ortamlarında karşılaşılan başlıca güvenlik problemleri:

4.4.1. Kritik Altyapıların Korunması

Enerji santralleri, üretim tesisleri ve ulaşım sistemleri gibi kritik altyapılar IoT teknolojilerinden yoğun şekilde yararlanmaktadır.

Bu sistemlere yönelik saldırılar:

- Üretim durması,
- Fiziksel ekipman hasarı,
- Operasyonel kayıplar oluşturabilir.

4.4.2. Gerçek Zamanlı Güvenlik Gereksinimi

Endüstriyel otomasyon sistemlerinde kararların çok kısa süre içerisinde verilmesi gerekir. Bu nedenle güvenlik mekanizmalarının:

- Düşük gecikmeli,
- Hafif yapılı,
- Gerçek zamanlı olması gerekmektedir.

Bu durum, geleneksel güvenlik çözümlerinin IoT ortamlarında doğrudan uygulanmasını zorlaştırmaktadır.

4.5. IoT Güvenliğinde Yapay Zekâ Kullanımının Gerekliliği

IoT sistemlerinde cihaz sayısının ve üretilen veri miktarının sürekli artması, geleneksel kural tabanlı güvenlik yöntemlerinin yetersiz kalmasına neden olmaktadır.

Yapay zekâ tabanlı güvenlik yöntemleri:

- Büyük veri analizi,
- Davranış modelleme,
- Anomali tespiti,
- Otomatik tehdit algılama konularında avantaj sağlamaktadır.

Makine öğrenmesi algoritmaları, normal sistem davranışını öğrenerek olağan dışı durumları tespit edebilmekte ve potansiyel saldırıları erken aşamada belirleyebilmektedir.

5. Yapay Zekâ Destekli IoT Siber Güvenlik Yaklaşımları

5.1. Yapay Zekânın IoT Güvenliğindeki Rolü

Nesnelerin İnterneti tabanlı sistemlerde cihaz sayısının hızlı biçimde artması, geleneksel güvenlik yaklaşımlarının ölçeklenebilirlik ve adaptasyon açısından yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Klasik güvenlik sistemleri çoğunlukla önceden tanımlanmış saldırı imzaları ve kurallara dayalı yöntemlerle çalışmaktadır. Ancak IoT ortamlarında cihaz çeşitliliğinin fazla olması, saldırı yöntemlerinin sürekli değişmesi ve büyük miktarda gerçek zamanlı veri üretilmesi, daha dinamik güvenlik çözümlerine ihtiyaç doğurmaktadır.

Yapay zekâ (Artificial Intelligence - AI), bu noktada IoT güvenliğinin geliştirilmesinde önemli bir araç olarak kullanılmaktadır. Makine öğrenmesi (Machine Learning - ML) ve derin öğrenme (Deep Learning - DL) yöntemleri, büyük miktardaki ağ trafiği ve cihaz davranışı verilerini analiz ederek normal davranış modellerini öğrenebilmekte ve olağan dışı durumları otomatik olarak tespit edebilmektedir.

Yapay zekâ tabanlı güvenlik yaklaşımlarının temel avantajları şu şekilde özetlenebilir:

- Önceden bilinmeyen saldırıları tespit edebilme,
- Büyük veri kümelerini hızlı analiz edebilme,
- Gerçek zamanlı tehdit algılama sağlayabilme,
- Sistem davranışlarından öğrenerek kendini geliştirebilme.

Al-Garadi ve arkadaşları (2018), makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemlerinin IoT güvenliğinde özellikle saldırı tespiti, kötü amaçlı yazılım analizi ve anomali algılama alanlarında yaygın olarak kullanıldığını belirtmektedir.

5.2. Makine Öğrenmesi Tabanlı Saldırı Tespit Sistemleri

Saldırı Tespit Sistemleri (Intrusion Detection Systems - IDS), ağ veya sistem aktivitelerini analiz ederek kötü amaçlı davranışları belirleyen güvenlik mekanizmalarıdır. Geleneksel IDS sistemleri çoğunlukla imza tabanlı çalışmaktadır. Bu yaklaşım bilinen saldırıları tespit etmede başarılı olsa da daha önce görülmemiş saldırılar karşısında sınırlı kalmaktadır.

Makine öğrenmesi tabanlı IDS sistemleri ise geçmiş verilerden öğrenerek yeni saldırı modellerini belirleyebilme yeteneğine sahiptir.

IoT ortamlarında kullanılan başlıca makine öğrenmesi algoritmaları:

- Karar ağaçları (Decision Trees)
- Rastgele Orman (Random Forest)
- Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machines - SVM)
- Naive Bayes
- K-En Yakın Komşu (KNN)
- Kümeleme algoritmaları olarak sıralanmaktadır.

5.2.1. Denetimli Öğrenme ile Saldırı Tespiti

Denetimli öğrenme yöntemlerinde model, saldırı ve normal trafik örneklerinden oluşan etiketli veri kümeleri ile eğitilmektedir.

Süreç genel olarak:

- Ağ trafiği verilerinin toplanması,
- Özelliklerin çıkarılması,
- Eğitim veri kümesinin hazırlanması,
- Model eğitimi,
- Yeni verilerin sınıflandırılması adımlarından oluşmaktadır.

IoT güvenliğinde kullanılan popüler veri kümeleri arasında:

- NSL-KDD,
- UNSW-NB15,
- CICIDS2017,
- Bot-IoT bulunmaktadır.

Bu veri kümeleri üzerinde yapılan çalışmalar, makine öğrenmesi algoritmalarının IoT saldırı tespitinde etkili sonuçlar verebildiğini göstermektedir.

5.2.2. Denetimsiz Öğrenme ile Anomali Tespiti

IoT ortamlarında tüm saldırı türlerinin önceden bilinmesi mümkün değildir. Bu nedenle denetimsiz öğrenme yöntemleri önemli avantaj sağlamaktadır.

Denetimsiz öğrenme algoritmaları, sistemin normal davranış modelini öğrenerek bu modelden farklı durumları anomali olarak işaretlemektedir.

Kullanılan yöntemler:

- K-Means,
- DBSCAN,
- Otomatik kodlayıcılar (Autoencoders),
- Boyut indirgeme teknikleri.

Özellikle büyük ölçekli IoT ağlarında cihaz davranışlarının sürekli izlenmesi ve olağan dışı hareketlerin belirlenmesinde etkili olmaktadır.

5.3. Derin Öğrenme Tabanlı IoT Güvenlik Yaklaşımları

Derin öğrenme, karmaşık veri yapılarından otomatik özellik çıkarımı yapabilmesi nedeniyle IoT güvenliğinde giderek daha fazla kullanılmaktadır.

Geleneksel makine öğrenmesi yöntemlerinde özellik çıkarımı çoğunlukla insan uzmanlığı gerektirirken, derin öğrenme modelleri bu işlemi otomatik gerçekleştirebilmektedir.

5.3.1. Evrişimsel Sinir Ağları (CNN) ile Güvenlik Analizi

CNN modelleri genellikle görüntü işleme uygulamalarıyla bilinmesine rağmen, ağ trafiği analizinde de kullanılmaktadır.

CNN tabanlı güvenlik modelleri:

- Ağ paketlerini analiz edebilir,
- Trafik örüntülerini öğrenebilir,
- Saldırı sınıflandırması gerçekleştirebilir.

IoT ağlarında yüksek boyutlu trafik verilerinin analizinde CNN modellerinin başarılı sonuçlar verdiği çeşitli araştırmalarda gösterilmiştir.

5.3.2. LSTM Tabanlı Saldırı Algılama

IoT sistemlerinde veri çoğunlukla zamana bağlı olarak değişmektedir. Sensör verileri, ağ hareketleri ve cihaz davranışları zaman serisi özelliği göstermektedir.

Long Short-Term Memory (LSTM) ağları, uzun dönemli bağımlılıkları öğrenebilme yeteneği nedeniyle zaman serisi tabanlı saldırı tespitinde yaygın şekilde kullanılmaktadır.

LSTM modelleri:

- Ağ trafik değişimlerini,
- Cihaz davranışlarını,
- Olağan dışı hareketleri

analiz ederek saldırı belirtilerini belirleyebilmektedir.

Kim ve arkadaşları (2016), derin öğrenme tabanlı yaklaşımların ağ saldırı tespitinde geleneksel yöntemlere alternatif oluşturabileceğini göstermiştir.

5.4. Federated Learning ile Gizlilik Koruyan IoT Güvenliği

IoT sistemlerinde yapay zekâ modellerinin eğitimi için büyük miktarda veri gerekmektedir. Ancak bu verilerin merkezi bir sunucuda toplanması;

- Gizlilik sorunları,
- Veri güvenliği riskleri,
- Haberleşme maliyetleri oluşturmaktadır.

Bu probleme çözüm olarak **Federated Learning (FL)** yaklaşımı geliştirilmiştir.

Federated Learning, verilerin merkezi sisteme aktarılması yerine modellerin cihaz üzerinde eğitilmesini ve yalnızca model güncellemelerinin paylaşılmasını sağlayan dağıtık makine öğrenmesi yaklaşımıdır.

McMahan ve arkadaşları (2017), federated learning yaklaşımının merkezi veri toplamadan makine öğrenmesi modelleri geliştirmek için etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir.

IoT güvenliğinde federated learning şu avantajları sağlamaktadır:

- Veri gizliliğinin korunması,
- Daha az veri aktarımı,
- Dağıtık öğrenme,
- Merkezi veri depolama risklerinin azaltılması.

Özellikle sağlık IoT sistemleri ve akıllı şehir uygulamalarında hassas verilerin korunması açısından önemli bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir.

5.5. Blockchain Destekli IoT Güvenliği

Blockchain teknolojisi, merkezi olmayan yapısı ve değiştirilemez kayıt mekanizması sayesinde IoT güvenliği için alternatif çözümler sunmaktadır.

IoT sistemlerinde blockchain kullanım amaçları:

- Güvenilir veri paylaşımı,
- Cihaz kimlik doğrulama,
- Veri bütünlüğünün korunması,
- Merkezi otorite ihtiyacının azaltılması olarak ifade edilebilir.

IoT ortamlarında çok sayıda cihazın birbirleriyle iletişim kurması, güvenilir kimlik yönetimi problemini ortaya çıkarmaktadır. Blockchain tabanlı yaklaşımlar, cihazların güvenilir şekilde kayıt altına alınmasını ve işlem geçmişinin izlenmesini sağlayabilir.

Dorri ve arkadaşları (2017), blockchain teknolojisinin IoT sistemlerinde güvenlik ve gizlilik problemlerinin çözümünde kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Bununla birlikte blockchain tabanlı çözümlerin IoT ortamlarında uygulanmasında bazı zorluklar bulunmaktadır:

- Yüksek hesaplama maliyeti,
- Enerji tüketimi,
- Ölçeklenebilirlik problemleri.

Bu nedenle IoT için hafif blockchain mimarileri üzerine çalışmalar devam etmektedir.

5.6. Açıklanabilir Yapay Zekâ (XAI) ile Güvenilir IoT Güvenliği

Yapay zekâ tabanlı güvenlik sistemlerinde önemli problemlerden biri, modellerin verdiği kararların nedeninin her zaman açıklanamamasıdır.

Özellikle kritik otomasyon sistemlerinde yalnızca saldırı tespiti yapmak yeterli değildir; sistem yöneticilerinin alınan kararın nedenini anlayabilmesi gerekir.

Açıklanabilir Yapay Zekâ (Explainable Artificial Intelligence - XAI), yapay zekâ modellerinin karar süreçlerini insan tarafından anlaşılabilir hâle getirmeyi amaçlamaktadır (Arrieta vd., 2020).

IoT güvenliğinde XAI kullanımı:

- Saldırı nedenlerinin açıklanması,
- Yanlış pozitiflerin azaltılması,
- Güvenilir karar desteği sağlanması açısından önem taşımaktadır.

5.7. Değerlendirme

Yapay zekâ destekli güvenlik yaklaşımları, IoT tabanlı akıllı otomasyon sistemlerinin korunmasında önemli fırsatlar sunmaktadır. Makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemleri büyük veri kümelerini analiz ederek geleneksel güvenlik çözümlerinin yakalayamadığı tehditleri belirleyebilmekte; federated learning ve blockchain gibi teknolojiler ise güvenlik ve gizlilik problemlerine yeni yaklaşımlar getirmektedir.

Bununla birlikte yapay zekâ tabanlı güvenlik sistemlerinin kendileri de bazı riskler taşımaktadır. Eğitim verilerinin manipüle edilmesi, adversarial saldırılar ve model güvenilirliği gibi problemler gelecekte üzerinde çalışılması gereken önemli araştırma alanlarıdır.

6. Gelecek Araştırma Eğilimleri ve Sonuç

6.1. IoT ve Yapay Zekâ Entegrasyonunda Gelecek Eğilimleri

Nesnelerin İnterneti tabanlı akıllı otomasyon sistemleri, bilgi işlem teknolojilerindeki gelişmeler doğrultusunda sürekli olarak dönüşmektedir. Sensör teknolojilerinin gelişmesi, haberleşme altyapılarının güçlenmesi, yapay

zekâ algoritmalarının ilerlemesi ve dağıtık hesaplama yaklaşımlarının yaygınlaşması; IoT sistemlerinin daha akıllı, güvenilir ve otonom hâle gelmesini sağlamaktadır.

Geleceğin IoT sistemlerinde temel eğilim yalnızca daha fazla cihazın birbirine bağlanması değil; bu cihazların çevrelerini algılayabilen, öğrenebilen, karar verebilen ve güvenli şekilde çalışabilen otonom sistemlere dönüşmesidir. Bu dönüşüm, bilgisayar mühendisliği alanında akıllı, güvenilir ve sürdürülebilir IoT mimarileri üzerine yeni araştırma alanlarının ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

Bu kapsamda gelecekte öne çıkması beklenen başlıca araştırma yönleri aşağıda açıklanmaktadır.

6.2. Trustworthy AI ve Güvenilir Yapay Zekâ Yaklaşımları

IoT sistemlerinde yapay zekâ tabanlı karar mekanizmalarının yaygınlaşmasıyla birlikte, yapay zekâ modellerinin güvenilirliği önemli bir araştırma konusu hâline gelmiştir. Özellikle kritik otomasyon sistemlerinde alınan kararların doğruluğu kadar, bu kararların güvenilir, açıklanabilir ve güvenli olması da önem taşımaktadır.

Güvenilir yapay zekâ (Trustworthy AI) yaklaşımı genel olarak aşağıdaki temel özellikleri kapsamaktadır:

- Güvenlik (Security)
- Açıklanabilirlik (Explainability)
- Şeffaflık (Transparency)
- Adalet (Fairness)
- Sağlamlık (Robustness)
- Gizlilik (Privacy)

IoT tabanlı otomasyon sistemlerinde yapay zekâ modellerinin yanlış karar vermesi, fiziksel sistemlerde doğrudan sonuçlara yol açabileceğinden güvenilirlik kritik öneme sahiptir.

Örneğin bir üretim tesisinde kullanılan yapay zekâ destekli kalite kontrol sisteminin hatalı karar vermesi üretim kayıplarına neden olabilir. Benzer şekilde sağlık IoT sistemlerinde yanlış tahminler kullanıcı güvenliği açısından önemli riskler oluşturabilir.

Gelecekte IoT sistemlerinde kullanılan yapay zekâ modellerinin yalnızca yüksek doğruluk oranına sahip olması değil, aynı zamanda karar süreçlerinin açıklanabilir olması beklenmektedir.

6.3. Açıklanabilir Yapay Zekâ (XAI) Tabanlı IoT Sistemleri

Derin öğrenme modelleri birçok alanda yüksek başarı göstermesine rağmen, karmaşık yapıları nedeniyle çoğu zaman “kara kutu” modeller olarak değerlendirilmektedir. Modelin hangi nedenlerle belirli bir karar verdiğinin bilinmemesi, özellikle kritik sistemlerde güven sorunlarına yol açmaktadır.

Açıklanabilir Yapay Zekâ (Explainable Artificial Intelligence - XAI), yapay zekâ modellerinin karar süreçlerini insan tarafından anlaşılabilir hâle getirmeyi amaçlamaktadır.

IoT tabanlı otomasyon sistemlerinde XAI kullanım alanları:

- Kestirimci bakım kararlarının açıklanması,
- Siber saldırı tespit sonuçlarının yorumlanması,
- Akıllı sağlık sistemlerinde karar desteği,
- Otonom sistemlerde güvenilir karar üretimi olarak sıralanabilir.

Özellikle endüstriyel IoT uygulamalarında operatörlerin yapay zekâ sistemlerinin önerilerini anlayabilmesi, insan-makine iş birliğinin geliştirilmesi açısından önemlidir.

6.4. 6G ve Yeni Nesil IoT Haberleşme Teknolojileri

Gelecekte IoT sistemlerinin yaygınlaşmasında haberleşme altyapıları kritik rol oynamaya devam edecektir. Mevcut 5G teknolojisi düşük gecikme süresi ve yüksek bağlantı kapasitesi ile IoT uygulamalarını desteklemektedir. Bununla birlikte gelecekte 6G teknolojisinin yaygınlaşmasıyla daha gelişmiş IoT uygulamalarının ortaya çıkması beklenmektedir.

6G destekli IoT sistemlerinin hedeflediği temel özellikler:

- Çok düşük gecikme,
- Çok yüksek bağlantı yoğunluğu,
- Yapay zekâ destekli ağ yönetimi,
- Daha yüksek enerji verimliliği olarak ifade edilmektedir.

6G teknolojisinin özellikle:

- Otonom araçlar,
- Akıllı şehirler,
- Endüstriyel otomasyon,
- Gerçek zamanlı robotik sistemler alanlarında yeni kullanım alanları oluşturması beklenmektedir.

6.5. Otonom Yapay Zekâ Ajanları ve IoT Sistemleri

Son yıllarda büyük dil modelleri ve otonom yapay zekâ ajanları, yapay zekâ araştırmalarında önemli bir gelişme alanı hâline gelmiştir. Geleneksel yapay zekâ modelleri belirli görevleri yerine getirirken, otonom yapay zekâ ajanları hedef belirleme, planlama ve araç kullanımı gibi daha gelişmiş yeteneklere sahip sistemler olarak değerlendirilmektedir.

IoT sistemlerinde yapay zekâ ajanlarının kullanımı gelecekte şu alanlarda önem kazanabilir:

- Otonom fabrika yönetimi,
- Akıllı enerji optimizasyonu,
- Robot koordinasyonu,
- Kendi kendini yöneten bakım sistemleri.

Bu yaklaşımda IoT cihazlarından gelen veriler yalnızca analiz edilmekle kalmayacak, yapay zekâ ajanları tarafından değerlendirilerek otomatik karar süreçleri oluşturulacaktır.

Ancak bu sistemlerin yaygınlaşmasıyla birlikte güvenlik, kontrol edilebilirlik ve etik kullanım konuları önemli araştırma başlıkları olacaktır.

6.6. Kuantum Sonrası IoT Güvenliği

Kuantum bilgisayar teknolojilerindeki gelişmeler, günümüzde kullanılan birçok kriptografik yöntemin gelecekte güvenlik açısından yeniden değerlendirilmesini gerektirmektedir.

IoT sistemlerinde kullanılan cihazların uzun yaşam döngülerine sahip olması nedeniyle, gelecekte kuantum bilgisayar saldırılarına karşı dayanıklı güvenlik mekanizmalarının geliştirilmesi önem taşımaktadır.

Kuantum sonrası kriptografi (Post-Quantum Cryptography - PQC) çalışmaları:

- Kuantum saldırılarına dayanıklı algoritmalar,
- Güvenli anahtar yönetimi,
- Hafif kriptografik yöntemler üzerine yoğunlaşmaktadır.

IoT cihazlarının sınırlı kaynaklara sahip olması nedeniyle gelecekte düşük hesaplama maliyetli kuantum sonrası güvenlik çözümleri önemli bir araştırma alanı olacaktır.

6.7. Sürdürülebilir ve Enerji Verimli IoT Sistemleri

IoT cihazlarının sayısındaki artış, enerji tüketimi ve sürdürülebilirlik konularını da gündeme getirmektedir. Özellikle milyarlarca sensörün uzun süre çalışması, enerji verimliliği sağlayan yeni mimarilere ihtiyaç oluşturmaktadır.

Gelecekte araştırmalar:

- Düşük enerji tüketimli sensörler,
- Enerji hasadı teknolojileri,
- Hafif yapay zekâ modelleri,
- Verimli haberleşme protokolleri

üzerinde yoğunlaşacaktır.

Ayrıca yapay zekâ modellerinin eğitim ve çalıştırma süreçlerinde ortaya çıkan yüksek hesaplama maliyetleri nedeniyle Yeşil Yapay Zekâ (Green AI) yaklaşımları önem kazanmaktadır.

6.8. Sonuç

Nesnelerin İnterneti tabanlı akıllı otomasyon sistemleri, fiziksel dünyadaki nesnelerin dijital sistemlerle bütünleşmesini sağlayarak modern bilgisayar mühendisliğinin en önemli araştırma alanlarından biri hâline gelmiştir. IoT teknolojileri başlangıçta temel veri toplama ve uzaktan izleme amacıyla

kullanılırken, yapay zekâ algoritmalarının entegrasyonu ile öğrenebilen, tahmin yapabilen ve otonom karar verebilen sistemlere dönüşmektedir.

Bu bölüm kapsamında IoT tabanlı akıllı otomasyon sistemlerinde yapay zekâ destekli karar mekanizmaları ve siber güvenlik yaklaşımları incelenmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, yapay zekânın IoT sistemlerinde özellikle kestirimci bakım, akıllı üretim, anomali tespiti ve saldırı algılama gibi alanlarda önemli katkılar sağladığı görülmektedir.

Bununla birlikte IoT sistemlerinin yaygınlaşması, beraberinde önemli güvenlik problemlerini de getirmektedir. Cihaz çeşitliliği, sınırlı kaynaklar, geniş saldırı yüzeyi ve veri gizliliği sorunları, IoT güvenliğinin temel araştırma alanları arasında yer almaktadır. Bu problemlerin çözümünde makine öğrenmesi, derin öğrenme, federated learning, blockchain ve açıklanabilir yapay zekâ gibi yeni nesil yaklaşımlar önemli fırsatlar sunmaktadır.

Gelecekte IoT sistemlerinin daha otonom, güvenilir ve sürdürülebilir hâle gelmesi beklenmektedir. Ancak bu dönüşümün başarılı olabilmesi için yalnızca teknolojik gelişmeler yeterli olmayacak; güvenlik, gizlilik, etik ve insan merkezli tasarım ilkelerinin birlikte ele alınması gerekecektir.

Sonuç olarak, yapay zekâ destekli IoT sistemleri; endüstriyel otomasyon, akıllı şehirler, sağlık teknolojileri ve kritik altyapılar gibi birçok alanda dijital dönüşümün temel bileşenlerinden biri olmaya devam edecektir.

KAYNAKÇA

Al-Garadi, M. A., Mohamed, A., Al-Ali, A. K., Du, X., Ali, I., & Guizani, M. (2020). A survey of machine and deep learning methods for Internet of Things (IoT) security. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 22(3), 1646–1685.

Alwarafy, A., Al-Thelaya, K. A., Abdallah, M., Schneider, J., & Hamdi, M. (2021). A survey on security and privacy issues in edge computing-assisted Internet of Things. IEEE Access, 9, 17334–17363.

Antonakakis, M., April, T., Bailey, M., Bernhard, M., Bursztein, E., Cochran, J., ... Zhou, Y. (2017). Understanding the Mirai botnet. Proceedings of the 26th USENIX Security Symposium, 1093–1110.

Arrieta, A. B., Díaz-Rodríguez, N., Del Ser, J., Bennetot, A., Tabik, S., Barbado, A., ... Herrera, F. (2020). Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI. Information Fusion, 58, 82–115.

Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A survey. Computer Networks, 54(15), 2787–2805.

Dorri, A., Kanhere, S. S., Jurdak, R., & Gauravaram, P. (2017). Blockchain for IoT security and privacy: The case study of a smart home. 2017 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops), 618–623.

European Commission. (2020). Ethics guidelines for trustworthy AI. Brussels: European Commission.

Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. Future Generation Computer Systems, 29(7), 1645–1660.

Kim, J., Kim, J., Thu, H. L. T., & Kim, H. (2016). Long short term memory recurrent neural network classifier for intrusion detection. 2016 International Conference on Platform Technology and Service (PlatCon), 1–5.

McMahan, B., Moore, E., Ramage, D., Hampson, S., & Arcas, B. A. (2017). Communication-efficient learning of deep networks from decentralized data. Proceedings of the 20th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS), 1273–1282.

Nguyen, D. C., Ding, M., Pathirana, P. N., Seneviratne, A., Li, J., & Poor, H. V. (2021). Federated learning for Internet of Things: A comprehensive survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 23(3), 1622–1658.

Roman, R., Zhou, J., & Lopez, J. (2013). On the features and challenges of security and privacy in distributed Internet of Things. Computer Networks, 57(10), 2266–2279.

Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2016). Edge computing: Vision and challenges. IEEE Internet of Things Journal, 3(5), 637–646.

Sicari, S., Rizzardi, A., Grieco, L. A., & Coen-Porisini, A. (2015). Security, privacy and trust in Internet of Things: The road ahead. Computer Networks, 76, 146–164.

Tahsien, S. M., Karimipour, H., & Spachos, P. (2020). Machine learning based solutions for security of Internet of Things (IoT): A survey. Journal of Network and Computer Applications, 165, 102694.

Xu, L. D., He, W., & Li, S. (2014). Internet of Things in industries: A survey. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 10(4), 2233–2243.

Xu, L. D., Xu, E. L., & Li, L. (2018). Industry 4.0: State of the art and future trends. International Journal of Production Research, 56(8), 2941–2962.

Zhang, W., Yang, D., & Wang, H. (2019). Data-driven methods for predictive maintenance of industrial equipment: A survey. IEEE Systems Journal, 13(3), 2213–2227.

BÖLÜM 6

Tıbbi Görüntülemede Radyasyon Güvenliği: Alara Prensibi, Doz Optimizasyon Teknikleri ve Taek Mevzuatı Çerçevesinde Klinik Yaklaşımlar

Seda Demir[1]

[1] Öğretim Görevlisi Doktor, Doğuş Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Görüntüleme Teknikleri, İstanbul/TÜRKİYE, Orcid ID: 0000-0002-8181-2945

1.GİRİŞ

Wilhelm Conrad Röntgen'in 1895 yılında X ışınlarını keşfetmesiyle birlikte tıp dünyası, o güne kadar görülmemiş bir tanısal olanak kazanmıştır. Deri altındaki kemiklerin görüntülenebilmesinin yarattığı heyecan, beraberinde derin bir bilinmezliği de taşıyordu. Bu gizemli enerji insan vücuduna ne kadar zarar verebilirdi? Keşiften yalnızca birkaç yıl sonra, radyasyona aşırı maruz kalan araştırmacılarda deri yanıkları, saç dökülmesi ve kanser vakalarının görülmesi, bilim insanlarını bu soruyla yüzleşmek zorunda bıraktı. Bugün ise iyonlaştırıcı radyasyon; radyografi, bilgisayarlı tomografi (BT), floroskopi, nükleer tıp ve radyasyon tedavisi gibi onlarca modalite aracılığıyla modern tıbbın ayrılmaz bir parçası hâline gelmiş, her yıl milyonlarca tanısal işlemde kullanılmaktadır. Bu gelişim süreci, radyasyonun sağladığı klinik yararla beraberinde getirdiği biyolojik riski birlikte yönetme zorunluluğunu da doğurmuştur.

İyonlaştırıcı radyasyonun biyolojik etkileri iki temel kategoride ele alınmaktadır. Deterministik etkiler, belirli bir eşik dozu aşıldığında ortaya çıkar ve doz arttıkça şiddeti artar; katarakt, deri eriteması ve akut radyasyon sendromu bu gruptandır. Stokastik etkiler ise eşiksiz bir olasılık ilişkisiyle tanımlanır: radyasyon maruziyeti, etki gerçekleşmese dahi kanser ve kalıtsal bozukluk riskini orantılı biçimde artırır. Tıbbi görüntülemede uygulanan dozlar genellikle deterministik eşiklerin çok altında kalsa da, özellikle tekrarlayan BT incelemeleri ve floroskopik girişimler göz önüne alındığında, kümülatif stokastik risk göz ardı edilemez. Nitekim yapılan epidemiyolojik çalışmalar, tıbbi görüntülemeden kaynaklanan iyonlaştırıcı radyasyonun toplumsal kanser yükünün önemli bir bölümünden sorumlu olabileceğine işaret etmektedir. Bu bulgu, tanısal radyolojide doz yönetimini yalnızca teknik bir tercih olmaktan çıkarmakta; etik ve yasal bir zorunluluk düzeyine taşımaktadır. Bu zorunluluğun uluslararası karşılığı, "As Low As Reasonably Achievable" (ALARA) ilkesidir. Uluslararası Radyolojik Korunma Komisyonu (ICRP) tarafından sistematize edilen bu ilke; radyasyona maruziyetin, ekonomik ve sosyal faktörler gözetilerek makul olan en düşük düzeyde tutulmasını esas almaktadır (*Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyonu'nun 2007 Tavsiyeleri*, 2007). ALARA, salt bir teknik kılavuz değil; hastanın, sağlık çalışanının ve toplumun iyonlaştırıcı radyasyona karşı korunmasını amaçlayan kapsamlı bir korunma felsefesidir. Günümüzde bu ilke; Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) tarafından yürürlüğe konulan yasal düzenlemeler ve Sağlık Bakanlığı'nın radyoloji hizmetlerine ilişkin yönetmelikleri aracılığıyla ülkemizde de bağlayıcı bir çerçeveye kavuşturulmuş olup tıbbi görüntüleme alanında görev yapan tüm sağlık profesyonellerini doğrudan ilgilendirmektedir (Kararları, n.d.). Ancak 2018 sonrası yapılan idari değişikliklerle TAEK'e ait yetkilerin büyük bir kısmı günümüzde Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu (TENMAK) ve Nükleer Düzenleme Kurumu (NDK) tarafından devralınmıştır (Kararnamesi, Resmî, Cumhurbaşkanlığı, & İşler Başkanlığı, n.d.).

Genel olarak kitabın bölümlerinde; radyasyon dozunun temel kavramlarını ve ölçüm birimlerini ele aldıktan sonra ALARA ilkesinin tarihsel gelişimini ve teorik altyapısını inceleyecektir. Ardından, başta BT olmak üzere çeşitli görüntüleme modalitelerinde uygulanan doz optimizasyon tekniklerine ve tanısal referans düzeylerine (DRL) ilişkin güncel yaklaşımlar aktarılacaktır. Türkiye'deki yasal mevzuat çerçevesi ve yapay zekâ destekli optimizasyon yöntemleri gibi gelecek perspektifleriyle tamamlanacaktır. Bölümün temel amacı, tıbbi görüntüleme teknisyeni ve teknikeri adaylarına hem teorik bir zemin hem de klinik uygulamada karşılaşacakları doz yönetimi sorularına yanıt verecek pratik bir başvuru kaynağı sunmaktır.

Tıbbi görüntülemede hiçbir radyasyon dozu, sağlanacak tanısal yarardan bağımsız olarak değerlendirilemez. Gerekçelendirme ilkesi uyarınca, elde edilmesi beklenen klinik bilginin maruz kalınan riskten açıkça üstün olduğu durumlarda iyonlaştırıcı radyasyon kullanımı onaylanır. Bu ilke; gereksiz tetkikten kaçınmayı, klinik endikasyonu doğrulamayı ve mümkün olan her durumda radyasyon içermeyen alternatif modaliteleri değerlendirmeyi kapsamaktadır.

Radyasyon dozunu ifade etmek için kullanılan birimler, maruziyetin farklı boyutlarını ölçmektedir. Soğurulan doz (D), birimi Gray (Gy) olan ve birim kütledeki maddeye aktarılan enerjiyi tanımlayan fiziksel büyüklüktür; 1 Gy = 1 J/kg eşitliğiyle ifade edilir. Eşdeğer doz (H), soğurulan dozu radyasyon ağırlık faktörüyle (wR) çarparak farklı radyasyon tiplerinin biyolojik etkilerini karşılaştırılabilir kılar ve birimi Sievert (Sv)'dir. X ışınları ve gama radyasyonu için wR = 1 olduğundan, tıbbi görüntülemede Gray ve Sievert sayısal olarak eşdeğerdir (Mahesh, 2013a). Etkin doz (E) ise farklı doku ve organların radyasyona duyarlılığını doku ağırlık faktörleriyle (wT) ağırlıklandırarak tek bir Sv değerine indirger; bu sayede farklı tetkiklerin karşılaştırılması ve toplumsal risk tahmini mümkün hâle gelir (ICRP, n.d.). Örneğin standart bir göğüs PA grafisi yaklaşık 0,02 mSv etkin doza karşılık gelirken, abdomen BT incelemesinde bu değer 8–10 mSv düzeyine ulaşabilmektedir (Mettler, Huda, Yoshizumi, & Mahesh, 2008).

2. ALARA İLKESİNİN TEMELLERİ

Radyasyondan koruma, yalnızca belirli bir doz sinirinin altında kalmakla sinirli bir hedef değildir. Gerçek amaç, tanısal yeterliliğinden odun vermeksizin maruziyeti makul olan en düşük düzeye indirmektir. Bu anlayışın uluslararası ifadesi olan ALARA ilkesi; hem bir teknik kılavuz hem de radyasyon kullanan her sağlık profesyonelinin mesleki kimliğinin parçası olması gereken bir koruma felsefesidir. Radyasyondan korunma biliminin tarihi, tehlikenin farkına varılmasıyla başlamış ve zaman içinde giderek olgunlaşan bir standartlar serisi aracılığıyla günümüze ulaşılan bir birikim surecidir. Bu surecin anlaşılması,

ALARA' nın neden bu sekli aldığını ve neden bağlayıcı bir uluslararası çerçeve haline geldiğini kavramak için zorunludur.

1928 yılında kurulan Uluslararası Radyolojik Korunma Komisyonu (ICRP), bugün hala yürürlükte olan radyasyon güvenliği standartlarının uluslararası otoritesidir. Kurulusunun ilk yıllarında komisyon, öncelikli olarak mesleki maruziyete ilişkin pratik sınırlar belirlemeye odaklanmıştır. Bu donemde radyasyona ilişkin biyolojik anlayış henüz gelişim aşamasında olduğu için standartlar büyük ölçüde ampirik gözlemlere dayanmaktadır (Kang, 2016).

1977 tarihli ICRP Yayın 26, radyasyon korumasının tarihindeki dönüştürücü bir adımı temsil etmektedir (The International Commission on Radiological Protection, 1977). Bu yayınla birlikte optimizasyon ilkesi ilk kez sistematik bir bicimde tanımlanmış; radyasyona maruziyetin yalnızca bir sınırın altında tutulması değil, sosyoekonomik etkenler göz önünde bulundurularak makul olan en düşük düzeye indirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Bu yayın aynı zamanda ALARA kavramının resmi çerçevesini çizen ilk ICRP belgesidir(Clarke & Valentin, n.d.).

Çernobil kazasının (1986) ardından radyasyona ilişkin biyolojik anlayıştaki gelişmeler ve epidemiyolojik çalışmalar, ICRP' yi 1990 yılında kapsamlı bir güncelleme yapmaya yöneltti (*The Internatıonal Chernobyl Project Proceedıngs Of An Internatıonal Conference Assessment Of Radıologıcal Consequences And Evaluatıon Of Protectıve Measures*, N.D.). ICRP Yayın 60, mesleki etkin doz limitini yılda 50 mSv' den 5 yıllık ardışık ortalama 20 mSv' ye indirerek önemli bir sıkılaşma getirdi (Hacıosmanoğlu, 2025). Bu güncelleme, Türkiye'nin 2000 yılında yayımladığı Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği'nin birincil uluslararası referansı olmuştur (Türkiye Cumhuriyeti, 2000).

2007 yılında yayımlanan ICRP Yayın 103, günümüzdeki radyasyon koruma sisteminin temel belgesidir (*The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, n.d.). Bu yayın; koruma sistemini üç ilke etrafında yeniden yapılandırmış, doz limitlerini korurken optimizasyon yaklaşımını derinleştirmiş ve tıbbi maruziyete özgü düzenleme ilkelerini daha belirgin biçimde ortaya koymuştur (Wrixon, 2008). Türkiye'nin 2020 yılında gerçekleştirdiği yönetmelik revizyonu, bu yayınla uyumu güçlendirme amacını taşımaktadır (Türkiye Cumhuriyeti, 2000).

Radyasyondan korunma standartlarının tarihsel gelişimi incelendiğinde, ICRP tarafından yayımlanan temel raporların hem küresel koruma felsefesini yönlendirdiği hem de Türkiye'deki ulusal mevzuat altyapısının kronolojik dönüm noktalarını belirlediği görülmektedir. 1928 yılındaki ilk ampirik sınırlandırmalardan başlayarak, 1977 (ICRP 26) ve 1990 (ICRP 60) tavsiyeleriyle olgunlaşan ve günümüzde 2007 (ICRP 103) yayını ile modern halini alan bu evrimsel süreç ile bu sürecin ulusal yönetmeliklerimize olan yansımaları Tablo 2.1'de sunulmuştur.

Tablo 2.1 ICRP Yayınlarının Kronolojisi ve Türkiye Uyumu

Yıl	ICRP Yayını	Temel Yenilik	Türkiye Yansıması
1928	ICRP kuruluşu	İlk mesleki doz sınırlar	—
1977	ICRP 26	Optimizasyon / ALARA kavramı	Mevzuat altyapısı oluşmaya başlıyor
1990	ICRP 60	20 mSv /yıl sınırı; LNT modeli	2000 Yönetmeliği'nin temeli
2007	ICRP 103	Üç ilke sistemi; tıbbi maruziyete özel düzenleme	2020 Yönetmelik revizyonu

ICRP:Uluslararası Radyolojik Korunma Komisyonu; mSv: miliSievert ; LNT: Linear No-Threshold

2.1. Üç Temel Koruma İlkesi

ICRP 103 radyasyon korumasını birbirini tamamlayan üç ilke üzerine inşa etmiştir. Bunlar gerekçelendirme, optimizasyon ve doz sınırlamasıdır. Bu üçlü yapı; hem bireysel hastanın korunmasını hem de radyasyon çalışanlarının ve toplumun güvencesini sağlamak üzere tasarlanmıştır. Her ilke farklı bir soruya yanıt verir. Örneğin; gerekçelendirme "bu tetkik gerekli mi?", optimizasyon "bu tetkikte doz nasıl en aza indirilir?", doz sınırlaması ise "hiç kimse bu sınırın üzerinde doz almamalıdır" diye yanıtlanır.

2.1.1. Gerekçelendirme (Justification)

Gerekçelendirme ilkesi, iyonlaştırıcı radyasyon kullanan her tıbbi girişimin net bir klinik yararının olması gerektiğini zorunlu kılar. Bir tetkikten elde edilmesi beklenen tanısal bilginin, hastanın maruz kalacağı radyasyon riski üzerinde açıkça üstün olmadığı durumlarda o tetkik gerekçelendirilemez ve gerçekleştirilmemelidir.

Pratikte gerekçelendirme iki katmanlı bir sorumluluğu kapsar. Bunlarından birincisi iyonlaştırıcı radyasyon mı kullanılmalı, yoksa MRG (Manyetik Rezonans Görüntüleme) veya ultrasonografi yeterli mi sorusuna cevap modalite gerekçelendirmesi, ikincisi ise bu tetkik bu hasta için bu zamanda gerekli mi sorusuna cevap bireysel tetkik gerekçelendirmesidir. Türkiye'de Sağlık Bakanlığı'nın yayımladığı konsültasyon kriterleri ve Avrupa Komisyonu

Referral Guidelines dokümanı bu kararlara kanıta dayalı bir çerçeve sunmaktadır (*Protection Radiation N° 178 Referral Guidelines for Medical Imaging Availability and Use in the European Union*, n.d.).

2.1.2. Optimizasyon (ALARA)

Bir tetkike karar verildikten sonra devreye giren optimizasyon ilkesi, o tetkikin tanısal yeterliliği koruyarak en düşük dozla gerçekleştirilmesini hedefler. ALARA (As Low As Reasonably Achievable) bu ilkenin operasyonel adıdır. Optimizasyon; kVp ve mAs seçimini, otomatik tüp akım modülasyonunun kullanılmasını, iteratif rekonstrüksiyon algoritmalarının uygulanmasını ve tanısal referans düzeyleriyle kurumsal doz izlemeyi kapsar (Baş & Gelal, 2025).

Optimizasyonun sınırı, görüntü kalitesinin tanısal yetersizliğe düşmediği noktadır. Bu sınırı tanımlamak teknik bir karar olduğu kadar klinik bir yargıdır: rutin abdomen BT'de kabul edilebilir gürültü düzeyi, küçük karaciğer lezyonlarının karakterizasyonunda kabul edilebilir gürültü düzeyinden farklıdır. “En düşük doz” hedefinin tanısal görüntülemenin gerçekleriyle her zaman doğrudan bağdaşmadığı fark edildikçe, ALARA' nın pratik yorumlarını düzenlemek amacını taşıyan iki tamamlayıcı kavram geliştirilmiştir. Bunlar; ALADA (As Low As Diagnostically Acceptable) ve ALADAIP (As Low As Diagnostically Acceptable being Indication-oriented and Patient-specific). Bu üç kavramın doğru anlaşılması, tekniker ve teknisyenlerin günlük klinik kararlarını daha bilinçli vermesine önemli katkı sağlar (Oenning, Jacobs, & Salmon, 2021).

ALADA, doz azaltmanın sınırını tanısal kabul edilebilirlik olarak çizer. Bu yaklaşıma göre doz; tetkikin klinik amacı göz önünde bulundurulduğunda, tanısal bilginin elde edilebileceği en düşük düzeyde olmalıdır. ALADA, “mümkün olan en düşük dozdan ziyade tanısal amaç için yeterli olan en düşük doz” mesajını verir. Bu fark oldukça önemlidir, çünkü çok düşük doz, görüntü kalitesini tanısal yetersizliğe düşürerek hastanın yeniden tetkike alınmasını gerektirebilir; bu da kümülatif dozu artırır (Yılmaz & Bulakbaşı, 2025).

ALADAIP, ALADA 'ya bir adım daha ekler: doz, yalnızca tanısal kabul edilebilirlik düzeyinde değil, aynı zamanda tetkikin spesifik endikasyonunun gerektirdiği kalite standardıyla da sınırlandırılmalıdır. Örneğin; akciğer nodülü tarama BT'sinde yüksek uzaysal çözünürlük kritik bir gereklilik iken, sistit hastasında pnömotoraks tanısı için çok daha düşük kaliteli bir görüntü yeterli olabilir. ALADAIP, bu endikasyona özgü kalite hedefini doz seçiminin merkezine yerleştirir (Oenning et al., 2018). Bu 3 kavramın karşılaştırılması Tablo 2.2’de özetlenmiştir.

Tablo 2.2 ALARA, ALADA ve ALADAIP Karşılaştırması

Kavram	Temel Soru	Odak Noktası	Klinik Örnek
ALARA	Makul olan en düşük doz nedir?	Sosyoekonomik denge	Rutin abdomen BT'de genel protokol seçimi
ALADA	Tanısal açıdan kabul edilebilir en düşük doz nedir?	Görüntü kalite sınırı	Tarama BT'de nodülün saptanabilmesi yeterli
ALADAIP	Bu endikasyona özgü kalite için en düşük doz nedir?	Endikasyon spesifik hedef	Pnömotoraks -> düşük kalite yeterli; YRBT -> yüksek çözünürlük zorunlu

BT: Bilgisayarlı Tomografi, YRBT: Yüksek Çözünürlüklü Bilgisayarlı Tomografi

2.1.3. Doz Sınırlaması (Dose Limitation)

Doz sınırlaması, gerekçelendirme ve optimizasyonun yetersiz kaldığı durumlarda devreye giren ve hiç kimsenin belirli eşiğin üzerinde doz almaması gerektiğini güvenceye alan bir güvenlik ağı işlevi görür. TAEK Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği'nde tanımlanan bu sınırlar, hastalar için değil; mesleki ve bireysel maruziyetler için geçerlidir. Tıbbi görüntülemede hastaya uygulanan doz, tetkikin tanısal gereksinimlerine göre belirlenir ve sınır kavramı bu bağlamda uygulanmaz; ancak hasta için de optimizasyon ve gerekçelendirme ilkeleri koruyucu işlev görür.

Tıbbi ve endüstriyel ışınlamalarda radyasyondan korunmanın üçüncü temel ayağını oluşturan doz sınırlanlaması (dose limitation) ilkesi, çalışanların ve toplum bireylerinin maruz kalabileceği izin verilen maksimum radyasyon dozlarını yasal çerçevede belirler. Ülkemizde yürürlükte olan ulusal mevzuat uyarınca; radyasyon görevlileri için ardışık beş yılın ortalaması esas alınarak yıllık etkin doz sınırı 20 mSv olarak tanımlanmış, tek bir yılda ise bu dozun 50 mSv'i aşmaması şartı getirilmiştir (Türkiye Cumhuriyeti, 2000). Toplum bireyleri için yıllık etkin doz sınırı 1 mSv ile kısıtlanırken; 16–18 yaş arası stajyer/öğrenciler ve gebelik sürecindeki radyasyon çalışanları için daha hassas koruma eşikleri öngörülmüştür. Çeşitli kişi grupları ile organ/doku özelinde (göz merceği, el/ayak/cilt) tanımlanan bu yıllık doz limitleri ve uygulama esasları Tablo 2.3' de özetlenmiştir.

Tablo 2.3 TAEK Yönetmeliği: Yıllık Doz Limitleri

Kişi Grubu	Etkin Doz	Göz Merceği	El/Ayak/Cilt	Açıklama
Radyasyon görevlisi (5 yıl ort.)	20 mSv/yıl	150 mSv	500 mSv	Hiçbir tek yıl 50 mSv'i aşamaz
Radyasyon görevlisi (tek yıl max)	50 mSv	—	—	5 yıllık ortalama sınırı geçmemeli
Toplum bireyi (genel)	1 mSv/yıl	15 mSv	50 mSv	Özel durumda 5 yıl ort. 1 mSv
16-18 yaş stajyer/öğrenci	6 mSv/yıl	—	—	Öğretim amaçlıysa geçerli
Hamile radyasyon görevlisi	1 mSv (gebelik boyunca)	—	—	Karın yüzeyinde sınırlama

mSv: miliSievert, ort.:ortalama,

2.2. Stokastik ve Deterministik Etkilerin Koruma Sistemindeki Yeri

ALARA' nın nicel çerçevesini anlamak için iki temel radyobiyolojik kavrama geri dönmek gerekmektedir. Bunlar deterministik ve stokastik etkilerdir. Bu iki etki kategorisi hem doz limitlerinin belirlenmesinde hem de optimizasyonun pratik hedeflerinde farklı roller üstlenmektedir.

Deterministik etkiler, belirli bir eşik doz aşıldığında ortaya çıkar ve dozun artmasıyla şiddetlenir. Katarakt, deri eriteması, saç dökülmesi ve akut radyasyon sendromu bu gruptandır. ICRP 103'un doz limitleri, büyük ölçüde deterministik etkilerin önlenmesine yönelik olarak belirlenmiştir ve bu bağlamda mesleki çalışanlar için 150 mSv/yıl göz merceği limiti ve 500 mSv/yıl el/cilt limiti, bu organlarda deterministik hasar eşiklerinin altında tutulması amacını taşımaktadır (Dicle, 2025).

Stokastik etkiler için eşik yoktur; radyasyon dozu, etki gerçekleşmese bile kanser ve kalıtsal bozukluk riskini orantılı biçimde arttırır. Tıbbi görüntülemede uygulanan dozlar deterministik eşiklerin çok altında kalsa da, özellikle kümülatif BT incelemeleri göz önünde bulundurulduğunda stokastik risk göz ardı edilemez.

İşte tam bu noktada ALARA devreye girer ve stokastik riskin hiç sıfıra indirilememesi, ama optimizasyonla minimize edilebilmesi, ALARA' yı yalnızca deterministik korumanın ötesinde anlam kazandırmaktadır (Brenner & Hall, 2007).

Radyasyon korunmasının standart biyolojik dayanağı, Lineer Eşiksiz Modelidir (LNT - Linear No-Threshold). Bu modele göre, ne kadar düşük olursa olsun her radyasyon dozu kanser riskini orantılı biçimde artırır. LNT modeli, doz limitlerinin ve ALARA' nın biyolojik gerekçesini oluşturur. Ancak modelin düşük doz bölgesindeki (< 100 mSv) geçerliliği bilimsel tartışma gündemini meşgul etmeye devam etmektedir (*Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation*, 2006). Bazı araştırmacılar bu bölgedeki riskin LNT' nin öngördüğünün altında kalabileceğini savunmaktadır. Bununla birlikte, belirsizlik ortamında ihtiyatlı ilkeyi benimsemek ve ALARA' yı korunma çerçevesinin temeli olarak sürdürmek, uluslararası bilimsel konsensusu yansıtmaktadır (Puskin, 2009).

3. BİLGİSAYARLI TOMOGRAFİ'DE DOZ OPTİMİZASYONU TEKNİKLERİ

Bilgisayarli Tomografi (BT), modern tıbbi görüntülemenin vazgeçilmez bir aracı haline gelmiş olmakla birlikte, yüksek tanısal değerini görece yüksek bir radyasyon dozu pahasına sunmaktadır. Dünya genelinde gerçekleştirilen tüm radyolojik tetkiklerin yalnızca %10'unu oluşturmasına karşın BT, tıbbi görüntülemeden kaynaklanan kolektif radyasyon dozunun yaklaşık %40-70'inden sorumludur (on the Effects of Atomic Radiation, 2025). Bu oran, BT'de doz optimizasyonunu hem bireysel hasta güvenliği hem de halk sağlığı açısından kritik bir önceliğe taşımaktadır. BT'de doz, birbiriyle etkilesen birden fazla teknik parametre tarafından belirlenir. Bu parametreleri doğru anlamak, teknisyen ve teknikerlerin protokol seçiminden görüntü kalitesi değerlendirmesine kadar pek çok klinik kararı bilinçli biçimde vermesini sağlar (Mahesh, 2013b). Bu bölümde tüp voltajı (kVp), tüp akımı (mAs), otomatik tüp akim modülasyonu (ATCM), pitch faktörü ve görüntü rekonstrüksiyon yöntemleri ele alınacak; ardından klinisyenin en sık karşılaştığı dozimetrik büyüklükler olan CTDIvol (BT doz indeksi hacmi), DLP (doz-uzunluk çarpımı) ve SSDE (Size-Specific Dose Estimate- boyuta özgü doz tahmini) açıklanacaktır (McCollough et al., 2011a).

3.1 Tüp Voltajı (kVp)

Tüp voltajı, X ışını tüpündeki elektron demetinin hızlandırılması için uygulanan elektriksel potansiyel farkını ifade eder ve birimi kilovolt pik (kVp) olarak gösterilir. kVp, üretilen X ışınlarının maksimum enerjisini belirleyerek hem doku geçirgenliği hem de görüntü kontrastı üzerinde doğrudan etki yapar. Tüp voltajı ile doz arasındaki ilişki lineer değil, üstel karakterdedir ve kVp' nin yaklaşık 2,3. kuvvetiyle orantılıdır. Bu ilişki, kVp' deki küçük bir azalmanın doz üzerinde büyük bir etki yarattığı anlamına gelir (Yu et al., 2009). Örneğin tüp

voltajı 120 kVp 'den 100 kVp' ye düşürüldüğünde doz yaklaşık %40 azalırken, 80 kVp' ye inildiğinde bu azalma %65-70 düzeylerine ulaşabilmektedir (Siegel, Schmidt, Bradley, Suess, & Hildebolt, 2004).

kVp düşürüldüğünde düşük enerjili foton miktarı artacağından yumuşak doku kontrastı yükselir; bu durum özellikle kontrast madde kullanan çalışmalarda avantaj sağlar. Ancak düşük enerjili fotonlar dokuyu daha az geçeceğinden dedektöre ulaşan foton sayısı azalır ve görüntü gürültüsü artar. Bu gürültünün kabul edilebilir düzeyde tutulabilmesi için mAs (miliamper*saniye) değerinin eş zamanlı artırılmasını ya da iteratif rekonstrüksiyon algoritmalarından yararlanılması gerekebilir.

3.2. Tüp Akımı ve Ekspojur Süresi

Tüp akımı (mA), birim zamanda X ışını tüpünden gecen elektron miktarını; ekspojur (şutlama) süresi (s) ise tüpün aktif kaldığı süreyi ifade eder. Bu iki değerinin çarpımı olan mAs, bir X-ışını cihazında üretilen toplam foton miktarını ve dolayısıyla dedektöre ulaşan sinyal miktarını belirler.

kVp' nin üstel etkisinin aksine mAs ile doz arasındaki ilişki doğrusaldır. Bu özellik, mAs optimizasyonunu doz yönetiminin en öngörebilir ve kontrol edilebilir aracı haline getirir.

Görüntü gürültüsü (sigma), mAs' ın karekökü ile ters orantılıdır. Gürültüyü yarıya indirmek için mAs' ı dört katına çıkarmak gerekirken, mAs' ı dörtte birine indirmek gürültüyü yalnızca iki katına çıkarır. Dolayısıyla mAs 'ta yapılan mütevazi azalmalar kabul edilebilir gürültü artışlarına yol açar (Goldman, 2007).

Spiral BT'de masa kesintisiz ilerlediğinden belirli bir anatomik noktanın kaç kez tarandığı pitch faktörüne bağlıdır. Efektif mAs bu ilişkiyi şöyle özetler (Mahesh, Scatarige, Cooper, & Fishman, 2001);

Efektif mAs = Tüp mAs / Pitch *Pitch > 1 ise efektif doz azalır.*

Rutin klinik pratikte mAs seçiminin en iyi çerçevesi: öncelikle tetkikin tanısal amacı belirlenir, ardından o amacın gerektirdiği minimum görüntü kalitesi tanımlanır, son olarak bu kaliteyi sağlayan en düşük mAs seçilir. Gereksiz yüksek mAs hem hastaya zarar verir hem de meslek hastalığı riski taşır.

3.3. Otomatik Tüp Akım Modülasyonu (ATCM)

Sabit bir mAs değeriyle gerçekleştirilen taramalarda, dokunun her yönde ve her kesitte farklı zayıflatma özelliği göstermesi nedeniyle bazı bölgeler gereğinden fazla, bazıları ise gereğinden az doz almaktadır. Otomatik Tüp Akım Modülasyonu (ATCM), bu sorunu çözmek için tüp akımını anlık olarak doku kalınlığına ve yoğunluğuna göre uyarlayan bir teknolojidir.

Bu sistemde 2 farkı modülasyon hesaplama tekniği kullanılır. İlk olarak açısal modülasyon (x-y ekseni) tekniği; Her projeksiyonda tüp dönerken, gantry' nin

farklı açılarındaki doku kalınlığı ölçülür ve mAs buna göre anlık ayarlanır. Örneğin omuz hizasında lateral pozisyonda tüp kalın doku tabakasını geçerek yüksek mAs kullanırken, AP (anterior-posterior) pozisyonda daha ince dokudan geçtiğinde mAs' ı düşürür. İkici teknik Z-ekseni modülasyonu (kraniokaudal)'dur. Tarama boyunca farklı anatomik bölgelerin doku kalınlıkları değişir. Z-ekseni modülasyonu bu geçişleri algılayarak her kesit için uygun mAs değerini prospektif veya gerçek zamanlı olarak hesaplar (Kalra et al., 2004). Bu tekniği kullanan sistemler Tablo 3.1' de verilmiştir (Söderberg & Gunnarsson, 2010).

Tablo 3.1 Başlıca BT Üreticilerinin ATCM Sistemleri

Üretici	Sistem Adı	Modülasyon Türü	Referans Parametre
Siemens Healthineers	CARE Dose 4D	Açısal + Z-eksen	Referans mAs
GE Healthcare	AutomA 3D / SmartmA	Açısal + Z-eksen	Noise Index
Philips Healthcare	DoseRight (ACS) / Z-DOM	Açısal + Z-eksen	Image Quality (IQ)
Canon Medical	Sure Exposure 3D	Açısal + Z-eksen	SD Degeri
Toshiba Medical	Sure Exposure 3D	Açısal + Z-eksen	Noise Index

SD: standard deviation; ACS:Automatic Current Selection ;NI: noise index; ST: scanning type; ATCM : Otomatik Tüp Akım Modülasyonu

ATCM kullanımı tek başına protokol kalitesini garanti etmez; modülasyon aralığının (mA min -mA max) doğru ayarlanması gerekir. Alt sınırın çok düşük belirlenmesi görüntü kalitesini tehlikeye atarken, üst sınırın çok yüksek bırakılması obez hastalar için öngörülemeyen yüksek dozlara yol açabilir.

3.4. Pitch Faktörü

Spiral BT'de masa, tarama sırasında kesintisiz hareket etmektedir. Pitch faktörü, bir tam gantry rotasyonundaki masa ilerlemesinin X ışını demet genişliğine oranı olarak tanımlanır.

Pitch ile doz arasındaki ilişki ters orantılıdır. Pitch değeri arttıkça masa her rotasyonda daha fazla ilerler; dolayısıyla tarama süresi kısalır ve sabit tüp yükü

koşullarında hasta radyasyon dozu genellikle azalır. Buna karşılık düşük pitch değerlerinde aynı anatomik alan için daha fazla veri örtüşmesi elde edilir; ancak tarama süresi uzayabilir ve radyasyon maruziyeti artabilir.

Pitch'in doz ve görüntü kalitesi üzerindeki etkisi tek başına değerlendirilmemelidir. Tüp voltajı, tüp akımı-zaman ürünü, otomatik tüp akımı modülasyonu, dedektör kolimasyonu, gantry rotasyon süresi, hasta habitusu, EKG senkronizasyonu ve görüntü rekonstrüksiyon tekniği bu ilişkiyi belirgin biçimde değiştirir. Bu nedenle pitch, klinik soruya ve kullanılan BT sisteminin teknik özelliklerine göre optimize edilmelidir.

Düşük pitch değerleri, yaklaşık 0,5'in altında veya 0,5–0,9 aralığında, hasta masasının nispeten yavaş ilerlemesine ve z-ekseni boyunca daha yoğun veri örneklemesine yol açar. Bu yaklaşım ayrıntılı anatomik değerlendirme, hareket kontrolü veya yüksek veri örtüşmesinin önemli olduğu incelemelerde yararlı olabilir. Bununla birlikte düşük pitch kullanımı, tarama süresini uzatabildiği için solunum tutma kapasitesi sınırlı, ajite veya koopere olamayan hastalarda her zaman ideal seçenek değildir. Ayrıca daha yüksek veri örtüşmesi, kullanılan tüp akımı ve doz modülasyon stratejisine bağlı olarak radyasyon maruziyetini artırabilir.

Yaklaşık 1,0–1,2 düzeyindeki pitch değerleri, görüntü kalitesi, radyasyon dozu ve tarama süresi arasında dengeli bir yaklaşım sağlar. Bu nedenle genel amaçlı BT incelemelerinde referans veya orta düzey pitch aralığı olarak değerlendirilebilir. Rutin toraks, abdomen ve pelvik BT protokollerinde klinik endikasyona, hastanın vücut yapısına ve cihaz kapasitesine göre bu aralıkta veya buna yakın değerlerde tarama yapılabilir (Amacker, Mader, Alkadhi, Leschka, & Frauenfelder, 2012).

Pitch'in yaklaşık 1,2–1,5 aralığına yükseltilmesi, rutin toraks ve abdomen incelemelerinde tarama süresinin ve radyasyon dozunun azaltılmasına katkı sağlayabilir. Bu yaklaşım özellikle nefes tutma süresinin sınırlı olduğu olgularda, travma hastalarında veya geniş anatomik alanların değerlendirilmesinde pratik avantaj oluşturur. Çalışmalar, uygun tüp akımı ayarlamaları ve iteratif rekonstrüksiyon teknikleriyle birlikte yüksek pitch protokollerinin tanısal görüntü kalitesini korurken radyasyon dozunu anlamlı düzeyde azaltabildiğini göstermektedir. Rutin toraks-abdomen BT'de yüksek pitch ve iteratif rekonstrüksiyon kombinasyonu ile dozun standart pitch protokollerine göre yaklaşık %64–75 oranında azaltılabildiği bildirilmiştir (Gariani, Martin, Botsikas, Becker, & Montet, 2018).

1,5'in üzerindeki yüksek pitch değerleri, çok kısa tarama sürelerinin gerekli olduğu durumlarda önem kazanır. Travma değerlendirmesi, torakoabdominal BT anjiyografi, geniş anatomik kapsama alanı gerektiren vasküler incelemeler ve hareket artefaktı riskinin yüksek olduğu hastalar bu yaklaşımın başlıca uygulama alanlarıdır. Yüksek pitch ile toraks ve abdomenin 2 saniyeden daha kısa sürede,

kesintisiz anatomik kapsama ile taranabildiği; torakoabdominal BT anjiyografide radyasyon dozunun konvansiyonel tekniklere göre yaklaşık %45–50 azaltılabildiği gösterilmiştir (Apfaltrer et al., 2012).

Pitch arttığında, z-ekseni boyunca elde edilen ham veri örnekleme yoğunluğu azalabilir. Bu nedenle yüksek pitch kullanımı teorik olarak longitudinal çözünürlüğün azalmasına, görüntü gürültüsünün artmasına veya bazı koşullarda interpolasyon kaynaklı artefaktların belirginleşmesine neden olabilir. Ancak bu ilişkinin klinik görüntü kalitesine doğrudan ve değişmez şekilde yansıdığı söylenemez. Güncel çok kesitli BT sistemlerinde geniş dedektör alanı, hızlı gantry rotasyonu, gelişmiş rekonstrüksiyon algoritmaları ve iteratif veya derin öğrenme temelli rekonstrüksiyon yöntemleri, yüksek pitch'in yol açabileceği görüntü kalitesi kaybını önemli ölçüde telafi edebilmektedir. Özellikle hareket artefaktı açısından yüksek pitch paradoksal biçimde avantajlı olabilir. Tarama süresinin kısalması, solunuma, kardiyak harekete veya hasta hareketine bağlı artefaktları azaltabilir. Bu nedenle görüntü kalitesi yalnızca kesitsel veya z-ekseni çözünürlüğü üzerinden değil; gürültü, kontrast çözünürlüğü, hareket artefaktı, anatomik kapsama alanı ve tanısal kabul edilebilirlik ile birlikte değerlendirilmelidir (Mahesh, 2002).

Kardiyak BT anjiyografide pitch seçimi, standart vücut BT protokollerinden farklı bir mantıkla yapılmalıdır. Geçmişte kardiyak görüntülemede düşük pitch değerleri sıklıkla kullanılmıştır. Özellikle retrospektif EKG kapılı spiral taramalarda, kardiyak siklusun farklı fazlarından veri elde etmek amacıyla düşük pitch tercih edilmiştir. Ancak bu yaklaşımın başlıca dezavantajı, radyasyon dozunun yüksek olabilmesidir.

Güncel dual-source BT sistemlerinde, seçilmiş hastalarda prospektif EKG tetiklemeli yüksek pitch spiral kardiyak BT anjiyografi uygulanabilmektedir. Bu teknik, kalbi tek veya sınırlı sayıdaki kardiyak siklusta taramayı hedefler. Düzenli sinüs ritmi bulunan ve kalp hızı genellikle 60–65 atım/dakikanın altında olan hastalarda, yüksek pitch protokolleri çok düşük dozda tanısal koroner arter görüntülemesi sağlayabilir. Bir çalışmada pitch 3,4 kullanılan yüksek pitch kardiyak BT protokolünde etkin doz yaklaşık 1,21 mSv olarak bildirilmiş; prospektif tetiklemeli ve retrospektif EKG kapılı protokollerde bu değerler sırasıyla 3,12 mSv ve 11,81 mSv bulunmuştur. Aynı çalışmada hareketten arınmış koroner segment oranı yüksek pitch grubunda %99 olarak saptanmıştır (Sommer et al., 2010). Benzer şekilde, klinik uygulamada yüksek pitch spiral koroner BT anjiyografide medyan etkin dozun 0,63 mSv düzeyinde olabildiği; prospektif sekansiyel ve retrospektif spiral yöntemlerde ise sırasıyla 1,32 mSv ve 4,77 mSv doz değerlerine ulaşıldığı bildirilmiştir. Bununla birlikte yüksek pitch kardiyak protokoller her hasta için uygun değildir. Yüksek veya düzensiz kalp hızı, atriyal fibrilasyon, belirgin ritim değişkenliği, yüksek vücut kitle indeksi ve yetersiz nefes tutma, görüntü kalitesini sınırlayabilir. Bu hastalarda prospektif

sekansiyel veya retrospektif EKG kapılı incelemeler daha güvenilir bir seçenek olabilir (Kosmala, Petritsch, Weng, Bley, & Gassenmaier, 2019).

Pitch, spiral BT'de yalnızca tarama hızını belirleyen teknik bir parametre değil; radyasyon dozu, hareket artefaktı, görüntü gürültüsü, z-ekseni örneklemesi ve klinik iş akışı üzerinde etkili olan bir optimizasyon aracıdır. Düşük pitch, yüksek veri örtüşmesi ve ayrıntılı değerlendirme gerektiren koşullarda tercih edilebilirken; orta pitch değerleri rutin BT incelemelerinde denge sağlar. Yüksek pitch ise uygun hasta ve cihaz koşullarında tarama süresini belirgin biçimde kısaltır, radyasyon dozunu düşürür ve hareket artefaktlarını azaltabilir. Bu nedenle pitch seçimi sabit bir aralık veya yalnızca anatomik bölgeye göre yapılmamalıdır. Her incelemede klinik endikasyon, hedef anatomik yapı, hastanın kalp ritmi ve solunum kapasitesi, vücut habitusu, BT cihazının teknik kapasitesi ve kullanılacak rekonstrüksiyon yöntemi birlikte değerlendirilmelidir. Temel amaç, tanısal yeterlilikten ödün vermeden mümkün olan en düşük radyasyon maruziyetini sağlamaktır; bu yaklaşım ALARA ilkesinin BT protokol optimizasyonundaki karşılığıdır (Apfaltrer et al., 2012)

3.5. Görüntü Rekonstrüksiyon Yöntemleri

Bilgisayarlı tomografide (BT) görüntü rekonstrüksiyonu, dedektörlerden elde edilen ham izdüşüm (projeksiyon/sinogram) verilerinin klinik olarak yorumlanabilir kesit görüntülerine dönüştürülmesi sürecidir. On yıllar boyunca analitik yaklaşımlar altın standart kabul edilmiş olsa da; düşük doz ihtiyacı, artefakt yönetimi ve yüksek uzaysal çözünürlük talepleri, bu paradigmayı iteratif algoritmalara ve son olarak yapay zekâ (AI) temelli yaklaşımlara taşımıştır.

3.5.1. Filtered Back Projection (FBP)

Bilgisayarlı tomografinin gelişim sürecinde uzun yıllar klinik görüntü rekonstrüksiyonunun temel standardı olan Filtrelenmiş Geri Projeksiyon (Filtered Back Projection, FBP), projeksiyon verilerinden kesitsel görüntü elde etmeye yönelik analitik bir yöntemdir. Yöntem, idealize edilmiş paralel ya da fan-beam geometri koşullarında ters Radon dönüşümünün pratik uygulamasına dayanır. Bu yaklaşımda her projeksiyon, geri projeksiyon sırasında ortaya çıkabilecek bulanıklığı dengelemek amacıyla önce matematiksel bir işlemden (rampa/konvolüsyon filtresi) geçirilir; daha sonra filtrelenmiş projeksiyonlar görüntü matrisi üzerine geri yansıtılarak nihai kesitsel görüntü oluşturulur.

Hızlı çalışması, hesaplama gereksiniminin düşük olması ve tutarlı görüntü görünümü sağlaması, FBP'nin başlıca avantajlarıdır. Bununla birlikte FBP, görüntüleme zincirindeki kuantum gürültüsü, hasta attenüasyonuna bağlı foton istatistiği, fokal spot etkisi, dedektör yanıtı ve saçılma gibi fiziksel süreçleri rekonstrüksiyon aşamasında ayrıntılı biçimde modellemez. Özellikle düşük doz BT incelemelerinde dedektöre ulaşan foton sayısının azalması, görüntü gürültüsünü artırır. FBP'de kullanılan yüksek geçiren filtreler, uzaysal

çözünürlüğü desteklerken gürültü bileşenlerini de belirginleştirebilir (*IDose 4 Iterative Reconstruction Technique Breakthrough in Image Quality and Dose Reduction with the 4 Th Generation of Reconstruction*, n.d.).

Foton açlığı gelişen durumlarda—örneğin büyük vücut habitusu, yoğun anatomik bölgeler veya metalik materyal varlığında—FBP ile oluşturulan görüntülerde gürültü, CT sayısı sapmaları ve çizgi artefaktları daha belirgin olabilir. Bu nedenle FBP, standart doz koşullarında hızlı ve güvenilir bir yöntem olmakla birlikte, düşük doz BT uygulamalarında tanısal görüntü kalitesini sınırlayabilir. Bu sınırlılık, fiziksel ve istatistiksel veri modellerini daha ayrıntılı kullanan iteratif rekonstrüksiyon yöntemlerinin geliştirilmesinin temel nedenlerinden biridir (Li et al., 2016).

3.5.2. İstatistiksel Model Evrimi: İteratif Rekonstrüksiyon (IR)

Bilgisayar donanımındaki mimari gelişmelerle birlikte klinik pratiğe aktarılan İteratif Rekonstrüksiyon teknikleri, analitik yöntemlerin düşük doz kısıtlamalarını aşmak amacıyla projeksiyon verilerini döngüsel düzeltme algoritmalarıyla işleyen bir yapı sunar. Hibrit ve istatistiksel modeller (ASiR, iDose vb.) gürültüyü ham veri ile görüntü uzayı arasında yinelemeli olarak ayrıştırıp radyasyon maruziyetini belirgin ölçüde düşürürken; optik geometriyi, dedektör tepkisini ve foton fiziğini bütünüyle simüle eden model tabanlı sistemler (MBIR) uzaysal çözünürlüğü ve sinyal-gürültü oranını en üst seviyeye taşır. Bununla birlikte, MBIR protokollerinin gerektirdiği yoğun matematiksel işlem süreci acil klinik senaryolarda iş akışını yavaşlatabilmekte ve agresif gürültü filtrelemesi sonucunda radyologların alışkın olduğu doğal grenli doku yapısının kaybolarak tanısal güveni olumsuz etkileyebilecek yapay, pürüzsüz ("plastik benzeri") bir görünümün ortaya çıkmasına sebebiyet verebilmektedir (Zhang, Wang, Zeng, Tao, & Ma, 2018).

3.5.3. Derin Öğrenme Tabanlı Rekonstrüksiyon (DLIR)

Derin öğrenme tabanlı rekonstrüksiyon (DLIR), düşük doz BT incelemelerinde görüntü kalitesini korumayı veya iyileştirmeyi amaçlayan yeni nesil bir görüntü oluşturma yaklaşımıdır. Bu yöntem, FBP (Filtrelenmiş Geri Projeksiyon)' nin düşük dozda belirginleşen gürültü ve artefakt sorunlarını azaltmayı; klasik iteratif rekonstrüksiyonun oluşturabildiği aşırı düzgün, yapay görünümlü görüntü dokusunu ise sınırlamayı hedefler. DLIR uygulamaları, standart veya yüksek kaliteli referans verileri ile düşük dozlu görüntü veya projeksiyon verilerinden öğrenilen derin sinir ağlarını kullanır. Algoritma; gürültüyü baskılarken anatomik çevre, ince yapılar ve FBP (Filtrelenmiş Geri Projeksiyon) ' ye daha yakın doğal ses dosyasının kaydı çalışır. İşlem, kullanılan sistemlere göre görüntü boyutunda, sinogram/projeksiyon verisi düzeyinde veya hibrit biçimde gerçekleştirilebilir (Brady, 2023).

Düşük doz abdominal BT'de DLIR; görüntü akışlarını düşürür, sinyal-gürültü ve kontrast-gürültü oranlarını iyileştirebilir ve uygun klinik işlem fokal teşhis lezyonlarının saptanabilirliğini sağlar. Çalışmalarda, standart doza göre %35,1 azaltılmış dozda DLIR ile elde edilen görüntülerde çözünürlük lezyonu saptanabilirliğinde standart doz hibrit yinelemeli rekonstrüksiyona benzer olduğu; %65 azaltılmış dozda ise 0,5 cm'den büyük lezyonların saptanmasının korunabildiği görülmüştür (Jensen et al., 2022). Bununla birlikte DLIR, düşük doz görüntülemenin fiziksel sınırlamalarını tamamen ortadan kaldırmaz. Çok küçük lezyonlar, çok düşük kontrastlı yapılar, yoğun foton açlığı, belirgin hasta hareketi ve yüksek vücut alışkanlığı tanısal performansı sınırlanabilir. Bu nedenle DLIR, radyasyon dozunu azaltmada etkili bir araç ile birlikte; klinik endikasyon, hasta özellikleri, tarama parametreleri ve rekonstrüksiyon gücüyle birlikte optimize edilmelidir (Jensen et al., 2022).

3.6. Dozimetrik Büyüklükler

Bilgisayarlı Tomografide (BT) doz değerlendirmesi için kullanılan standart dozimetrik büyüklükler; hem protokol optimizasyonunun hem de denetiminin temel araçlarıdır. Bu büyüklüklerin tanımlanması, tıbbi görüntüleme teknikeri ve teknisyenlerinin cihaz konsolu üzerindeki doz göstergelerini doğru yorumlaması açısından vazgeçilmezdir.

Bilgisayarlı Tomografide (BT) radyasyon dozunun standartlaştırılmış bir göstergesi olan Bilgisayarlı Tomografi Doz İndeksi (CTDI), tarayıcının dilim başına düşen radyasyon çıktısını nicelendiren temel bir dozimetrik parametredir. Bu indeks, hastanın doğrudan absorbe ettiği doku dozundan ziyade, belirli tarama parametreleri altında cihazın yaydığı ışıma düzeyini ve sistemin doz performansını değerlendirmede birincil referans kabul edilir. BT teknolojisindeki dedektör ve tarama mekanizmalarının gelişimi, dozimetri yaklaşımlarında da kavramsal revizyonları beraberinde getirmiştir (McCollough et al., 2011b).

$CTDI_{100}$**:** Standart akrilik polimetil metakrilat (PMMA) fantomlar içine yerleştirilen 100 mm aktif hacme sahip kalem tipi bir iyonizasyon odası aracılığıyla tek bir aksiyel rotasyonda ölçülen dozu temsil eder.

$CTDI_w$ (Ağırlıklı CTDI): Doz dağılımının kesit yüzeyinde homojen olmaması nedeniyle geliştirilmiştir. Fantomun merkezinde ve periferinde ölçülen değerlerin ağırlıklı ortalaması alınarak ($CTDI_w = \frac{1}{3}CTDI_{merkez} + \frac{2}{3}CTDI_{çevre}$) tek bir dilim eksenindeki ortalama doz belirlenir.

$CTDI_{vol}$ (Hacimsel CTDI): Günümüz çok kesitli ve helikal (spiral) BT sistemlerinde standart gösterge haline gelen parametredir. Helikal harekette dilim örtüşmesini ya da aralıklarını hesaba katmak amacıyla, $CTDI_w$ değerinin pitch faktörüne (P) oranlanmasıyla hesaplanır:

$$CTDI_{vol} = \frac{CTDI_w}{P} \qquad (1)$$

Belirli bir tüp voltajı (kVp), tüp akımı-zaman çarpımı (mAs), kolimasyon genişliği ve pitch faktörü için hesaplanan $CTDI_{vol}$, hastanın anatomik boyutlarından veya tarama ekseni boyunca taranan uzunluktan bağımsız bir parametredir; bu doğrultuda hastanın doğrudan soğurduğu biyolojik dozu değil, sistemin protokole özgü radyasyon çıktısını nicelendirir. Bu dozimetrik çıktının standartlaştırılması ve karşılaştırılabilirliğinin sağlanması amacıyla polimetil metakrilat (PMMA) yapılı silindirik standart dozimetri fantomları kullanılmakta olup; sistemik kalibrasyonlarda kranial tetkikler ile pediatrik protokoller için 16 cm çapındaki fantom, gövde ve boyun incelemeleri için ise 32 cm çapındaki fantom temel referans geometri olarak kabul edilmektedir.

Modern sistemlerde hacimsel BT doz indeksi ($CTDI_{vol}$) tarayıcının kesit başına düşen ışıma potansiyelini temsil etse de, bir inceleme sırasında hastaya aktarılan toplam radyasyon enerjisini tek başına yansıtamaz. Bu sınırlılığı gidermek ve aksiyel yöndeki toplam maruziyeti nicelendirmek amacıyla Doz-Uzunluk Çarpımı (Dose-Length Product, DLP) parametresi kullanılmaktadır. DLP, tarama aralığı boyunca entegre edilen radyasyon miktarını ifade eder ve $CTDI_{vol}$ değerinin taranan aksiyel uzunluk (L, cm cinsinden) ile çarpılmasıyla elde edilir (Arfat, Haq, Beg, & Jaleel, 2024)

$$\mathrm{DLP} = \mathrm{CTDI_{vol}} \times L \quad (\mathrm{mGy \cdot cm}) \qquad (2)$$

Çok fazlı veya ardışık protokollerde, her bir tarama serisine ait DLP değerlerinin toplamı hastanın o incelemedeki kümülatif doz yükünü ortaya koyar. DLP, hasta boyutundan bağımsız olarak cihazın toplam çıktısını temsil ettiğinden, klinik kalite denetimlerinde ve Tanısal Referans Seviyeleri (DRL) ile protokol optimizasyonlarının karşılaştırılmasında evrensel bir metrik olarak kabul edilir. Protokoller arası tutarlılığın sürdürülmesi, ulusal ve uluslararası referans doz seviyeleriyle (DRL) uyumun denetlenmesi ve cihazlar arası dozimetrik sapmaların önlenmesi, düzenli aralıklarla yürütülen kalite kontrol ve fantom kalibrasyon programlarıyla güvence altına alınır (Arfat et al., 2024)

BT incelemelerinde ortaya çıkan stokastik biyolojik risklerin (özellikle radyasyona bağlı karsinojenez) tahmin edilmesinde kullanılan temel parametre Efektif Doz (E)'dur ve birimi Sievert (genellikle mSv) olarak tanımlanır. Efektif doz, heterojen ışınlanan vücut bölgelerinde farklı organ ve dokuların radyasyona karşı sergilediği biyolojik duyarlılığı hesaba katar:

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T \qquad (3)$$

Burada H_T, T dokusu veya organında soğurulan eşdeğer dozu; w_T ise Uluslararası Radyolojik Korunma Komisyonu (ICRP) tarafından belirlenen ve tüm vücut için toplamı 1'e eşit olan doku ağırlık faktörünü ($\sum w_T = 1$) temsil eder. Rutin klinik uygulamalarda her bir organın eşdeğer dozunu doğrudan

ölçmek mümkün olmadığından, efektif doz DLP değerinden türetilen ampirik dönüşüm katsayıları (k) aracılığıyla pratik bir yaklaşımla hesaplanır (*Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyonu'nun 2007 Tavsiyeleri*, 2007).

$$E \approx k \times \mathrm{DLP} \qquad (4)$$

Buradaki k katsayısı ($\mathrm{mSv} \cdot \mathrm{mGy}^{-1} \cdot \mathrm{cm}^{-1}$), taranan anatomik bölgeye (baş, boyun, toraks, batın, pelvis vb.), hasta yaşına ve kullanılan fantom boyutuna (16 cm veya 32 cm) bağlı olarak Monte Carlo simülasyonları ile modellenmiş standart faktörlerdir. Yetişkinler için literatürde kafa bölgesi için yaklaşık 0,0023, toraks için 0,014 ve karın-pelvis için 0,015 mSv/(mGy·cm) katsayıları bulunur. Kullanılan fantom boyutu, referans metodolojiye, yaş grubuna ve anatomik kapsama göre değişebileceğinden, elde edilen efektif dozu yalnızca yaklaşık bir tahmin olarak değerlendirilmelidir (Christner, Kofler, & McCollough, 2010).

$CTDI_{vol}$ ve DLP gibi geleneksel doz metrikleri hasta boyutunu göz ardı ettiğinden, daha doğru bir dozimetri için boyuta özgü doz tahmini (SSDE) kullanımı önerilmektedir. SSDE, AAPM Görev Grubu 204 raporunda tanımlanmış olup vücut BT incelemeleri için geliştirilmiştir; $CTDI_{vol}$'ün hastanın boyutunu dikkate alan bir düzeltme faktörüyle çarpımıyla elde edilir (Bentiane et al., 2026). Pediatrik hastalarda bu fark özellikle kritik boyutlara ulaşmaktadır. Pediatrik göğüs BT'lerini inceleyen bir çalışmada $CTDI_{vol}$, SSDE ile karşılaştırıldığında hasta grubuna göre radyasyon dozunu %31 ile %55 arasında değişen oranlarda sistematik biçimde düşük tahmin etmiştir; bu bulgu $CTDI_{vol}$'ün pediatrik protokol izlemesinde birincil parametre olarak kullanılmaması gerektiğini ortaya koymaktadır (Zancopè et al., 2025). Benzer şekilde, 2024 yılında pediatrik baş ve abdominal BT incelemelerini kapsayan bir çalışmada SSDE, tarayıcı ekranında görüntülenen $CTDI_{vol}$'den istatistiksel olarak anlamlı biçimde yüksek bulunmuş; baş BT için %0–17, abdominal BT için ise %37–60 oranında farklılık saptanmış ve $CTDI_{vol}$'ün pediatrik boyuta göre düzeltilmiş dozu düşük tahmin edebileceği gösterilmiştir (Chen, 2026).

Son dönem araştırmalar, SSDE'nin protokol optimizasyonunda, gereksiz maruziyetin azaltılmasında ve doz bilgisinin hastalar ile hekimlerle paylaşılmasında klinik değerini giderek daha güçlü biçimde ortaya koymaktadır(Bentiane et al., 2026). Uluslararası bir doz kayıt sisteminden elde edilen pediatrik BT verilerini inceleyen 143 kurumu kapsayan bir çalışmada DRL'ler; $CTDI_{vol}$, DLP ve SSDE olmak üzere üç büyüklük üzerinden ayrı ayrı hesaplanmış; bu yaklaşımın özellikle çocuklarda doz izlemenin hassasiyetini artırdığı vurgulanmıştır (Bos et al., 2025).

4. TANISAL REFERANS DÜZEYLERİ (DRL) VE DOZ DENETİMİ

Radyolojik görüntülemede uluslararası literatürdeki yaygın adıyla Diagnostic Reference Levels (DRL) olan ve Türkçe karşılığı Tanısal Referans Seviyeleri

(DRL), ulusal ve uluslararası düzeyde kabul görmüş en önemli doz optimizasyon araçlarından birini oluşturmaktadır. Standart anatomik boyutlara sahip yetişkin veya pediatrik hasta gruplarında rutin bir prosedür için gözlemlenen doz dağılımının 75. yüzdelik değerini temel alarak belirlenir (Vañó et al., 2017). Yasal bir doz sınırı niteliği taşımayan DRL'ler, klinik uygulamada kabul edilebilir doz aralıklarını tanımlayan kılavuz referanslar olarak işlev görür. Bir merkezin medyan ya da ortalama doz değerlerinin belirlenen bu eşiği sistematik biçimde aşması, uygulanan teknik parametrelerin, hasta pozisyonlandırmasının ve görüntüleme protokollerinin ivedilikle optimize edilmesi gerektiğine yönelik nesnel bir göstergedir. Uygulama sahası ve veri ölçeğine bağlı olarak kuruma özgü (LDRL) ve ulusal (NDRL) düzeyde sınıflandırılan bu referanslar; sağlık kuruluşunun kendi klinik popülasyonunun 75. yüzdelik değeri üzerinden tanımlanan kurumsal iç denetim göstergesini veya ülke çapındaki çok merkezli örneklemlerden türetilerek mevzuata esas teşkil eden standartları ifade eder. Bilgisayarlı tomografi incelemelerinde bu denetim mekanizması, cihazın kesit bazlı ışıma çıktısını temsil eden hacimsel bilgisayarlı tomografi doz indeksi ($CTDI_{vol}$, mGy) ile toplam maruziyeti yansıtan doz-uzunluk çarpımı (DLP, $mGy \cdot cm$) metrikleri üzerinden yürütülmektedir (*Annals o f the ICRP ICRP Publication 135 Diagnostic Reference Levels in Medical Imaging*, n.d.).

Türkiye genelinde ulusal düzeyde yasal olarak yürürlüğe konmuş resmi bir Ulusal Tanısal Referans Seviyesi (NDRL) veri tabanı henüz tamamlanmamış olsa da, kurumsal ve bölgesel düzeyde referans eşiklerinin oluşturulmasına yönelik geniş ölçekli epidemiyolojik çalışmalar ivme kazanmıştır. Bu bağlamda Kahraman ve arkadaşları (2024) tarafından gerçekleştirilen çok merkezli araştırmada, sekiz farklı bilgisayarlı tomografi sisteminden elde edilen toplam 104.272 tetkike ait dozimetrik veriler analiz edilerek yerel referans düzeyleri (LDRL) belirlenmiştir. Tablo 4.1'de karşılaştırmalı olarak verilen ve söz konusu çalışmanın bulguları incelendiğinde; rutin beyin ve düşük doz toraks protokollerine ait $CTDI_{vol}$ değerlerinin Avrupa Birliği NDRL standartlarıyla büyük ölçüde uyumlu seyrettiği, buna karşın standart toraks ile koroner BT anjiyografi gibi yüksek doz potansiyeli taşıyan incelemelerde uluslararası eşiklerin kısmen aşıldığı veya sınır değerlerde kaldığı görülmektedir (Kahraman, Haberal, & Ağıldere, 2024). Özellikle kardiyak protokollerdeki bu artış, prospektif EKG tetikleme gibi teknik optimizasyon stratejilerinin yaygınlaştırılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Ülke genelinde standart bir radyasyon izleme altyapısının kurulması amacıyla Nükleer Düzenleme Kurumu (NDK) ve ilgili kamu otoritelerinin koordinasyonunda yürütülen pilot doz kayıt sistemleri ise, gelecekteki ulusal mevzuata esas teşkil edecek geniş tabanlı NDRL kütüphanesinin oluşturulması açısından kritik bir geçiş basamağını temsil etmektedir.

Tablo 4.1 Türkiye LDRL Verileri ile Avrupa Birliği Tanısal Referans Seviyelerinin Karşılaştırılması

BT Protokolü	TR LDRL $CTDI_{vol}$ (mGy)	AB NDRL $CTDI_{vol}$ (mGy)	TR LDRL DLP (mGy*cm)	Klinik Değerlendirme ve Optimizasyon Önerisi
Rutin Beyin BT	46,2	50	652	AB referans değerleri ile uyumlu
Standart Toraks BT	11,4	10	398	Eşik düzeyde; tüp akımı modülasyonu denetlenmeli
Abdomen+Pelvis BT	14,6	15	862	Doz optimizasyon potansiyeli mevcut
Düşük Doz Toraks BT	3,2	3,5	112	Optimal doz aralığında
Koroner BT Anjiyografi	38,4	35	580	Eşik üstü; prospektif EKG tetikleme önerilir

$CTDI_{vol}$: Hacimsel BT doz indeksi; DLP: doz uzunluk ürünü; NDRL : Ulusal Tanısal Referans Seviyesi; LDRL: Kurumsal (lokal) Tanısal Referans Seviyesi

Klinik radyoloji pratiğinde sürdürülebilir bir kalite güvence altyapısının tesis edilmesi, radyasyon maruziyetinin döngüsel ve dinamik bir mekanizma çerçevesinde sürekli denetlenmesini zorunlu kılmaktadır. Modern klinik bilgi mimarisinde bu optimizasyon döngüsü; tetkik sonrasında oluşturulan yapılandırılmış DICOM doz raporlarından (DICOM SR /Structured Report) $CTDI_{vol}$ ve DLP parametrelerinin otomatik veri çekimi (data mining) yöntemiyle toplanmasıyla başlar (Kanal et al., 2017). Elde edilen dozimetrik veriler, protokol bazlı istatistiksel filtrelemeye tabi tutularak kurumun yerel referans düzeyleri (LDRL) ve ulusal standartlar (NDRL) ile sistematik biçimde karşılaştırılır; sapma saptanan protokoller için teknik revizyonlar ve parametre güncellemeleri yapılarak klinik geri bildirim zinciri tamamlanır. Bu entegre iş akışının yürütülmesinde endüstride yaygın olarak DoseWatch (GE Healthcare), Radimetrics (Bayer) ve DoseIQ (Siemens Healthineers) gibi ticari radyasyon dozu yönetim sistemleri (RDMS) kullanılmaktadır. Buna karşılık, ticari yazılım maliyetlerinin yüksek olduğu veya sınırlı finansal kaynaklara sahip sağlık kuruluşlarında, Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) tarafından geliştirilen ve açık kaynak kodlu erişilebilir bir çözüm sunan OpenDose platformu,

dozimetrik izlenebilirliğin ve kurumsal radyasyon güvenliğinin sağlanmasında etkin bir alternatif oluşturmaktadır (Internatıonal Atomıc Energy Agency, 2023).

5. YAPAY ZEKÂ DESTEKLİ DOZ OPTİMİZASYONU

Geleneksel tüp akımı/voltajı modülasyonları ve iteratif rekonstrüksiyon (IR) algoritmalarının doz azaltımında belirli bir teknik platoya ulaşması, yapay zekâ (YZ) ve derin öğrenme (DÖ) mimarilerini ALARA prensibinin merkezine taşımıştır. Çok merkezli büyük klinik veri setleriyle eğitilmiş derin evrişimli sinir ağlarını (CNN) temel alan Derin Öğrenme Rekonstrüksiyonu (DLR); filtrelenmiş geri projeksiyon (FBP) ve standart IR yöntemlerinden farklı olarak, öğrenilmiş gürültü modelleri ve anatomiye özgü doku ayrımı mekanizmasıyla çalışır. Bu sayede düşük dozlu çekimlerde uzaysal çözünürlüğü ve yapısal ayrıntıları korurken gürültüyü etkin biçimde bastırabilmektedir (Akagi et al., 2019). Klinik kullanıma giren ve uluslararası onay (FDA/CE) alan önde gelen platformlar (GE AIR Recon DL, Canon AiCE, Philips SharpView CT, ClariPI ClariCT.AI gibi sistemler), anatomik bölgeye göre radyasyon maruziyetinde %30 ila %91 arasında belirgin bir tasarruf potansiyeli sunmaktadır.

Doz yönetiminde yapay zekânın sunduğu ikinci kritik aşama ise akıllı ve dinamik protokol optimizasyonudur. Bu sistemler; taranan topogram/scout görüntülerinden anatomik bölgeleri otomatik olarak sınıflandırıp hasta habitusu ve kontrast dinamiğine göre optimum tüp gerilimini (kVp), tüp akımını (mAs) ve pitch değerini kestirebilmektedir. Ayrıca kurumun geçmiş tarama geçmişini analiz ederek protokolleri yerel referans düzeyleri (LDRL) ile uyumlu hâle getiren popülasyon tabanlı adaptif modellemeler sağlamaktadır. Buna karşın, DLR algoritmalarının aşırı düşük dozlarda yapay pürüzsüzleştirme ("over-smoothing" / plastik doku görünümü) üretebilmesi, buna bağlı olarak ince vasküler yapıların veya milimetrik nodüllerin gürültüyle birlikte silinme riski, her klinik entegrasyonun bağımsız sistem validasyonunu zorunlu kılmaktadır.

Türkiye'de 2020 yılı sonrasında yenilenen BT altyapılarında DLR donanımına sahip cihaz parkı kayda değer oranda artış göstermiş olmakla birlikte; bu sistemlerin etkin klinik kullanım oranları, protokol standardizasyonları ve yerel validasyon çalışmaları henüz gelişim aşamasındadır (Kahraman et al., 2024). Ülkemizde YZ tabanlı rekonstrüksiyon sistemlerine yönelik özel bir radyolojik denetim mevzuatının bulunmayışı nedeniyle, uluslararası CE ve FDA onaylı platformlar klinik kabul görmektedir. Düzenleyici otoritelerin (NDK/ilgili kamu kurumları) politika belirleme süreçlerine temel oluşturacak çok merkezli yerel validasyon araştırmaları ve tıbbi görüntüleme eğitim müfredatlarına yapay zekâ yetkinliklerinin entegrasyonu, Türkiye'deki radyasyon koruma ve doz optimizasyonu pratikleri açısından öncelikli gelişim alanlarıdır.

6.SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Radyasyon güvenliği, tıbbi görüntülemenin ayrılmaz bir parçasıdır ve bu alandaki yaklaşımlar son yarım yüzyılda köklü bir dönüşüm geçirmiştir. 1977 yılında ICRP Yayın 26 ile temelleri atılan üçlü koruma çerçevesi — gerekçelendirme, optimizasyon ve doz sınırlaması— bugün hâlâ geçerliliğini korumakta; ancak teknolojik gelişmeler bu ilkelerin uygulanma biçimini köklü olarak değiştirmektedir.

ALARA (As Low As Reasonably Achievable) prensibi, ilk ortaya çıkışından bu yana yalnızca bir doz azaltma hedefi olarak değil, klinik karar verme süreçlerini şekillendiren dinamik bir çerçeve olarak değerlendirilmelidir. Prensip; ALADA (As Low As Diagnostically Acceptable) ve ALADAIP (As Low As Diagnostically Acceptable Being Indication-Oriented And Patient-Specific) gibi türevleriyle genişlemiş, bireyselleştirilmiş ve hasta merkezli bir boyut kazanmıştır. Bu gelişim, radyasyon güvenliğinin salt teknik bir mesele olmadığını; klinisyen, teknisyen ve hastanın birlikte dahil olduğu bir süreç olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla ALARA prensibinin eğitim müfredatlarında ve klinik protokol belgelerinde yalnızca bir doz limiti olarak değil, hasta-hekim ilişkisine dair etik bir tutum olarak da yer alması gerekmektedir.

Bilgisayarlı tomografi, tıbbi görüntülemede en yüksek radyasyon dozu kaynaklarından biri olmaya devam etmekte; ancak aynı zamanda doz optimizasyonunun en ileri düzeyde uygulanabildiği modalite olma özelliği de taşımaktadır. kVp, mAs, pitch ve ATCM parametrelerinin doğru yönetimi; görüntü kalitesinden taviz vermeksizin hasta dozunu %20 ile %60 arasında azaltabilmektedir. Görüntü rekonstrüksiyon yöntemlerindeki evrim de bu süreçte belirleyici bir rol üstlenmiştir. Filtered Back Projection (FBP) ile başlayan süreç, iteratif rekonstrüksiyon algoritmalarıyla %15–40 oranında ek doz kazanımı sağlamış; ardından gelen derin öğrenme tabanlı rekonstrüksiyon (DLR) ile bu sınır %90 üzerine çıkmıştır. Bu ilerleme, yalnızca bir teknolojik yenilik değil; ALARA prensibinin pratiğe dökülmesinde bir paradigma değişikliğidir.

Radyolojik optimizasyonun nesnel biçimde denetlenmesinde Tanısal Referans Seviyeleri (DRL) anahtar rol oynamayı sürdürmektedir. Türkiye ölçeğinde yürütülen geniş tabanlı çok merkezli çalışmalar kurumsal düzeydeki yerel referansların (LDRL) uluslararası standartlarla büyük ölçüde örtüştüğünü ortaya koysa da; mevzuata dayalı resmi bir Ulusal Tanısal Referans Seviyesi (NDRL) kütüphanesinin henüz yasal zemine kavuşturulmamış olması temel bir eksiklik olarak varlığını korumaktadır. Nükleer Düzenleme Kurumu (NDK) ve ilgili kamu otoritelerinin pilot doz izleme girişimleri bu altyapıyı güçlendirmeyi hedeflerken, sağlık kuruluşları arasındaki yazılım entegrasyonu ve sistematik kayıt tutma farklılıklarının giderilmesi gerekmektedir

Klinik onaylı derin öğrenme platformlarının yaygınlaşması radyasyon güvenliğinde yeni ufuklar açsa da, bu modellerin aşırı düşük dozlarda üretebildiği doku pürüzsüzleştirme ve detay kaybı riskleri çok merkezli yerel klinik validasyonları zorunlu kılmaktadır. Gelecek perspektifinde; $CTDI_{vol}$ ve DLP verilerinin otomatik doz yönetim sistemleriyle sürekli izlenmesi, Türkiye'ye özgü NDRL standartlarının ve yapay zekâya yönelik düzenleyici yönergelerin tamamlanması, ayrıca radyoloji ve tıbbi görüntüleme teknikleri eğitimi müfredatına yapay zekâ ile doz denetimi yetkinliklerinin entegre edilmesi, hasta güvenliğini en üst düzeye ulaştırmada kritik önceliklerdir. Tanısal doğruluk ile asgari radyasyon dozu arasındaki dengenin sürdürülebilir kılınması; klinik uygulayıcıların, düzenleyici kurumların ve akademik araştırmacıların çok disiplinli iş birliğiyle mümkün olacaktır. Türkiye, sahip olduğu genç akademisyen nüfusu, büyüyen sağlık altyapısı ve yenilenmekte olan yasal çerçevesiyle bu alanda uluslararası literatüre anlamlı katkılar sunabilecek konumdadır.

KAYNAKÇA

Akagi, M., Nakamura, Y., Higaki, T., Narita, K., Honda, Y., Zhou, J., Awai, K. (2019). Deep learning reconstruction improves image quality of abdominal ultra-high-resolution CT. *European Radiology*, *29*(11), 6163–6171. https://doi.org/10.1007/s00330-019-06170-3

Amacker, N. A., Mader, C., Alkadhi, H., Leschka, S., & Frauenfelder, T. (2012). Routine chest and abdominal high-pitch CT: An alternative low dose protocol with preserved image quality. *European Journal of Radiology*, *81*(3), e392–e397. https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2011.12.017

Annals o f the ICRP ICRP Publication 135 Diagnostic Reference Levels in Medical Imaging. (n.d.). Retrieved from www.icrp.org

Apfaltrer, P., Hanna, E. L., Schoepf, U. J., Spears, J. R., Schoenberg, S. O., Fink, C., & Vliegenthart, R. (2012). Radiation Dose and Image Quality at High-Pitch CT Angiography of the Aorta: Intraindividual and Interindividual Comparisons With Conventional CT Angiography. *American Journal of Roentgenology*, *199*(6), 1402–1409. https://doi.org/10.2214/AJR.12.8652

Arfat, M., Haq, A., Beg, T., & Jaleel, G. (2024). Optimization of CT radiation dose: Insight into DLP and CTDI. *Future Health*, *2*, 148. https://doi.org/10.25259/FH_45_2024

Baş, H., & Gelal, F. M. (2025). Optimization in Computed Tomography. *Türk Radyoloji Seminerleri*. https://doi.org/10.4274/trs.2025.24174

Bentiane, O., Khettabi, O., Berradi, O., Sadiki, E. M., Bouzzit, F., & Touti, R. (2026). Beyond CTDIvol: Patient-specific SSDE and organ dose assessment in routine adult CT practice. *Radiation Physics and Chemistry*, *243*, 113658. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2026.113658

Bos, D., Wang, Y., Stewart, C., Chu, P. W., Luong, J., Haubold, J., … Smith-Bindman, R. (2025). Diagnostic reference levels for indication-based CT categories in pediatric CT: data from an international registry. *European Radiology*, *35*(12), 7985–7999. https://doi.org/10.1007/s00330-025-11724-9

Brady, S. L. (2023). Implementation of AI image reconstruction in CT—how is it validated and what dose reductions can be achieved. *The British Journal of Radiology*, *96*(1150). https://doi.org/10.1259/bjr.20220915

Brenner, D. J., & Hall, E. J. (2007). Computed Tomography — An Increasing Source of Radiation Exposure. *New England Journal of Medicine*, *357*(22), 2277–2284. https://doi.org/10.1056/NEJMra072149

Chen, T. (2026). Size-specific dose estimation in pediatric computed tomography: From dose characterization to individualized optimization. *World Journal of Radiology*, *18*(8). https://doi.org/10.4329/wjr.124887

Christner, J. A., Kofler, J. M., & McCollough, C. H. (2010). Estimating Effective Dose for CT Using Dose–Length Product Compared With Using Organ Doses: Consequences of Adopting International Commission on Radiological Protection Publication 103 or Dual-Energy Scanning. *American Journal of Roentgenology*, *194*(4), 881–889. https://doi.org/10.2214/AJR.09.3462

Clarke, R. H., & Valentin, J. (n.d.). *The History of ICRP and the Evolution of its Policies*.

Dicle, O. (2025). Ethical Principles of Protection from Radiation. *Türk Radyoloji Seminerleri*. https://doi.org/10.4274/trs.2024.24175

Gariani, J., Martin, S. P., Botsikas, D., Becker, C. D., & Montet, X. (2018). Evaluating the effect of increased pitch, iterative reconstruction and dual source CT on dose reduction and image quality. *The British Journal of Radiology*, 20170443. https://doi.org/10.1259/bjr.20170443

Goldman, L. W. (2007). Principles of CT: Radiation Dose and Image Quality. *Journal of Nuclear Medicine Technology*, *35*(4), 213–225. https://doi.org/10.2967/jnmt.106.037846

Hacıosmanoğlu, T. (2025). Radiation Safety Rules and Legal Regulations Radioactive Iodine (I-131) Treatment. *Nuclear Medicine Seminars*, *11*(1), 21–27. https://doi.org/10.4274/nts.galenos.2025.43534

Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation. (2006). Washington, D.C.: National Academies Press. https://doi.org/10.17226/11340

Icrp. (n.d.). *Annals of the ICRP Published on behalf of the International Commission on Radiological Protection*.

iDose 4 iterative reconstruction technique Breakthrough in image quality and dose reduction with the 4 th generation of reconstruction. (n.d.).

Internatıonal Atomıc Energy Agency. (2023). *Patient Radiation Exposure Monitoring in Medical Imaging*. Vienna:

Jensen, C. T., Gupta, S., Saleh, M. M., Liu, X., Wong, V. K., Salem, U., … Wagner-Bartak, N. A. (2022). Reduced-Dose Deep Learning Reconstruction for Abdominal CT of Liver Metastases. *Radiology*, *303*(1), 90–98. https://doi.org/10.1148/radiol.211838

Kahraman, G., Haberal, K. M., & Ağıldere, A. M. (2024). Establishment of local diagnostic reference levels for computed tomography with cloud-based automated dose-tracking software in Türkiye. *Diagnostic and Interventional Radiology*, *30*(3), 205–211. https://doi.org/10.4274/dir.2023.232265

Kalra, M. K., Maher, M. M., Toth, T. L., Schmidt, B., Westerman, B. L., Morgan, H. T., & Saini, S. (2004). Techniques and Applications of Automatic Tube

Current Modulation for CT. *Radiology*, *233*(3), 649–657. https://doi.org/10.1148/radiol.2333031150

Kanal, K. M., Butler, P. F., Sengupta, D., Bhargavan-Chatfield, M., Coombs, L. P., & Morin, R. L. (2017). U.S. Diagnostic Reference Levels and Achievable Doses for 10 Adult CT Examinations. *Radiology*, *284*(1), 120–133. https://doi.org/10.1148/radiol.2017161911

Kang, K. W. (2016). History and Organizations for Radiological Protection. *Journal of Korean Medical Science*, *31*(Suppl 1), S4. https://doi.org/10.3346/jkms.2016.31.S1.S4

Kararları, A. (n.d.). *T.C. Resmî Gazete Başbakanlık Mevzuatı Geliştirme ve Yayın Genel Müdürlüğünce Yayımlanır*.

Kararnamesi, C., Resmî, T. C., Cumhurbaşkanlığı, G., & İşler Başkanlığı, İ. (n.d.).

Kosmala, A., Petritsch, B., Weng, A. M., Bley, T. A., & Gassenmaier, T. (2019). Radiation dose of coronary CT angiography with a third-generation dual-source CT in a "real-world" patient population. *European Radiology*, *29*(8), 4341–4348. https://doi.org/10.1007/s00330-018-5856-6

Li, H., Dolly, S., Chen, H., Anastasio, M. A., Low, D. A., Li, H. H., … Mutic, S. (2016). A comparative study based on image quality and clinical task performance for CT reconstruction algorithms in radiotherapy. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, *17*(4), 377–390. https://doi.org/10.1120/jacmp.v17i4.5763

Mahesh, M. (2002). The AAPM/RSNA Physics Tutorial for Residents. *RadioGraphics*, *22*(4), 949–962. https://doi.org/10.1148/radiographics.22.4.g02jl14949

Mahesh, M. (2013). The Essential Physics of Medical Imaging, Third Edition. *Medical Physics*, *40*(7). https://doi.org/10.1118/1.4811156

Mahesh, M. (2013b). The Essential Physics of Medical Imaging, Third Edition. *Medical Physics*, *40*(7). https://doi.org/10.1118/1.4811156

Mahesh, M., Scatarige, J. C., Cooper, J., & Fishman, E. K. (2001). Dose and Pitch Relationship for a Particular Multislice CT Scanner. *American Journal of Roentgenology*, *177*(6), 1273–1275. https://doi.org/10.2214/ajr.177.6.1771273

McCollough, C. H., Leng, S., Yu, L., Cody, D. D., Boone, J. M., & McNitt-Gray, M. F. (2011). CT Dose Index and Patient Dose: They Are *Not* the Same Thing. *Radiology*, *259*(2), 311–316. https://doi.org/10.1148/radiol.11101800

McCollough, C. H., Leng, S., Yu, L., Cody, D. D., Boone, J. M., & McNitt-Gray, M. F. (2011b). CT Dose Index and Patient Dose: They Are *Not* the Same Thing. *Radiology*, *259*(2), 311–316. https://doi.org/10.1148/radiol.11101800

Mettler, F. A., Huda, W., Yoshizumi, T. T., & Mahesh, M. (2008). Effective Doses in Radiology and Diagnostic Nuclear Medicine: A Catalog. *Radiology*, *248*(1), 254–263. https://doi.org/10.1148/radiol.2481071451

Oenning, A. C., Jacobs, R., Pauwels, R., Stratis, A., Hedesiu, M., & Salmon, B. (2018). Cone-beam CT in paediatric dentistry: Dımıtra project position statement. *Pediatric Radiology*, *48*(3), 308–316. https://doi.org/10.1007/s00247-017-4012-9

Oenning, A. C., Jacobs, R., & Salmon, B. (2021). ALADAIP, beyond ALARA and towards personalized optimization for paediatric cone-beam CT. *International Journal of Paediatric Dentistry*, *31*(5), 676–678. https://doi.org/10.1111/ipd.12797

On the Effects of Atomic Radiation, U. N. S. C. (2025). *Sources, effects and risks of ionizing radiation*. UN.

Protection Radiation N° 178 Referral Guidelines for Medical Imaging Availability and Use in the European Union. (n.d.). https://doi.org/10.2833/18118

Puskin, J. S. (2009). Perspective on the use of LNT for radiation protection and risk assessment by the U.S. Environmental Protection Agency. *Dose-Response : A Publication of International Hormesis Society*, *7*(4), 284–291. https://doi.org/10.2203/dose-response.09-005.Puskin

Radıatıon Protectıon Publıshed For The International Commission On Radiological Protection By Pergamon Press Oxford · New York · Toronto · Sydney · Frankfurt. (1977).

Siegel, M. J., Schmidt, B., Bradley, D., Suess, C., & Hildebolt, C. (2004). Radiation Dose and Image Quality in Pediatric CT: Effect of Technical Factors and Phantom Size and Shape. *Radiology*, *233*(2), 515–522. https://doi.org/10.1148/radiol.2332032107

Söderberg, M., & Gunnarsson, M. (2010). Automatic exposure control in computed tomography – an evaluation of systems from different manufacturers. *Acta Radiologica*, *51*(6), 625–634. https://doi.org/10.3109/02841851003698206

Sommer, W. H., Albrecht, E., Bamberg, F., Schenzle, J. C., Johnson, T. R., Neumaier, K., … Nikolaou, K. (2010). Feasibility and Radiation Dose of High-Pitch Acquisition Protocols in Patients Undergoing Dual-Source Cardiac CT. *American Journal of Roentgenology*, *195*(6), 1306–1312. https://doi.org/10.2214/AJR.10.4416

The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. (n.d.).

The Internatıonal Chernobyl Project Proceedıngs Of An Internatıonal Conference Assessment Of Radıologıcal Consequences And Evaluatıon Of Protectıve Measures. (N.D.).

Türkiye Cumhuriyeti. (2000). *Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği*. Ankara.

Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyonu'nun 2007 Tavsiyeleri (Vol. 37). (2007). ICRP Yayın 103. Ann.

Vañó, E., Miller, D. L., Martin, C. J., Rehani, M. M., Kang, K., Rosenstein, M., Rogers, A. (2017). ICRP Publication 135: Diagnostic Reference Levels in Medical Imaging. *Annals of the ICRP*, *46*(1), 1–144. https://doi.org/10.1177/0146645317717209

Wrixon, A. D. (2008). New ICRP recommendations. *Journal of Radiological Protection*, *28*(2), 161–168. https://doi.org/10.1088/0952-4746/28/2/R02

Yılmaz, E., & Bulakbaşı, N. (2025). Optimization in Radiography. *Türk Radyoloji Seminerleri*. https://doi.org/10.4274/trs.2025.24171

Yu, L., Liu, X., Leng, S., Kofler, J. M., Ramirez-Giraldo, J. C., Qu, M., McCollough, C. H. (2009). Radiation dose reduction in computed tomography: techniques and future perspective. *Imaging in Medicine*, *1*(1), 65–84. https://doi.org/10.2217/iim.09.5

Zancopè, N., De Monte, F., Simeone, E., Giannone, A., Lombardi, R., Mele, A., Paiusco, M. (2025). Validation of SSDE calculation in a modern CT scanner and correlation with effective dose. *Scientific Reports*, *15*(1), 6091. https://doi.org/10.1038/s41598-025-90509-y

Zhang, H., Wang, J., Zeng, D., Tao, X., & Ma, J. (2018). Regularization strategies in statistical image reconstruction of low-dose x-ray <scp>CT</scp> : A review. *Medical Physics*, *45*(10). https://doi.org/10.1002/mp.13123

BÖLÜM 7

Yara İyileşmesinin İzlenmesinde Giyilebilir Biyosensörler: Güncel Gelişmeler, Zorluklar ve Gelecek Perspektifleri

Esra Armağan[1]

[1] Öğr. Gör., Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Ermenek Uysal ve Hasan Kalan Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Karaman, Türkiye,
ORCID: 0000-0002-5414-2392

1. Giriş

Yara iyileşmesi, doku bütünlüğünün ve işlevinin yeniden kazanılmasını sağlayan, zamansal olarak sıralı ancak kısmen örtüşen evrelerden oluşan karmaşık bir biyolojik süreçtir (Dong ve Guo, 2021). Küçük ve temiz yaralar vücudun kendi onarım mekanizmalarıyla kısa sürede kapanırken diyabetik ülserler, basınç yaraları, venöz bacak ülserleri ve komplike cerrahi insizyonlar gibi kronik ya da karmaşık yaralar ciddi bir klinik sorun olmaya devam etmektedir (Eriksson vd., 2022). Yalnızca kronik yaraların yönetimine yönelik yıllık harcamanın 20 milyar ABD dolarını aşabileceği (Pang vd., 2023), iyileşmeyen yaraların toplam maliyetinin ise yakın gelecekte 96,8 milyar ABD dolarına ulaşabileceği öngörülmektedir (Gupta, Kudtarkar, Pawar ve Ambre, 2025).

Akut bir yaranın kronikleşmesi tedavi süresini uzatır, maliyetleri artırır ve tam iyileşmeyi zorlaştırır. Bu dönüşümün en önemli belirleyicilerinden biri enfeksiyondur; enfeksiyon inflamasyonu şiddetlendirir, doku onarımını geciktirir ve sistemik komplikasyon riskini artırır (Uberoi, McCready-Vangi ve Grice, 2024). Dolayısıyla yaranın iyileşme evresinin doğru ve erken belirlenmesi, uygun tedavinin zamanında başlatılması açısından kritik öneme sahiptir (Q. Zeng, Qi, Shi, Zhang ve Haick, 2022).

Ne var ki rutin klinik uygulamada kullanılan izleme yöntemleri, zaman alıcı olmaları ve yaranın gerçek iyileşme evresini nicel olarak tanımlayamamaları nedeniyle sınırlı etkinliğe sahiptir (Pang vd., 2023). Hekimin öznel değerlendirmesine ve aralıklı laboratuvar testlerine dayanan bu yaklaşım, çoğu zaman müdahalenin gecikmesine yol açmaktadır. Bu noktada, iyileşme evresini gösteren biyobelirteçlerin derişimini doğrudan yara ortamında ölçebilen biyosensör tabanlı tanı sistemleri cazip bir alternatif sunmaktadır. Özellikle invaziv olmayan formatlar, tanıya kadar geçen sürenin kısaltılmasına olanak tanır (Janghorban, Aradanas, Kazemi, Ngaju ve Pandey, 2022). Bu olanak, büyük ölçüde 2010'lu yıllarda giyilebilir sensörlerin, özellikle de elektrokimyasal sensörlerin hızla gelişmesiyle mümkün olmuştur (Mahato ve Wang, 2021).

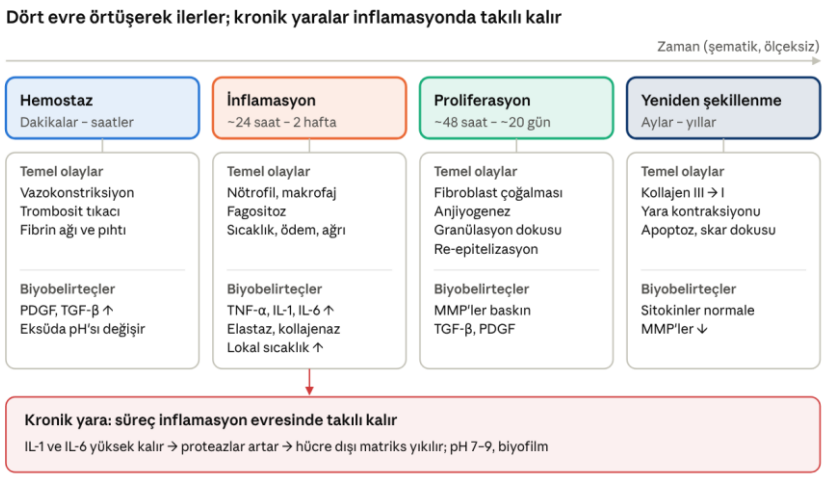
Giyilebilir biyosensörler, pH, sıcaklık, nem ve inflamatuvar belirteçler gibi kritik parametrelerin kesintisiz izlenmesine imkân vermektedir (C. Wang vd., 2024). Yara ortamındaki küçük değişiklikleri saptayabilmeleri, enfeksiyonun veya iyileşme bozukluğunun klinik bulgular belirginleşmeden fark edilmesini sağlar (Rodrigues, Kosaric, Bonham ve Gurtner, 2019). Esnek substratlar, mikroakışkan sistemler ve kablosuz iletişim modülleriyle bütünleşen günümüz cihazları uzaktan izlemeye olanak tanımakta (Kong vd., 2024); yapay zekâ ve veri analitiğinin eklenmesi ise karmaşık biyobelirteç verilerinin yorumlanmasını kolaylaştırarak öngörücü tanıya ve kişiselleştirilmiş tedavi stratejilerine zemin hazırlamaktadır (Ahmed, Mohamed, Zeeshan ve Dong, 2020).

Literatürde yara iyileşmesinin izlenmesine yönelik giyilebilir sensörleri ele alan derlemelerin önemli bir kısmı sıcaklık, pH ve oksijen gibi fiziksel ve basit kimyasal parametrelere odaklanmaktadır (Vo ve Trinh, 2025). Oysa IUPAC tanımına göre bir biyosensör, bir fizikokimyasal dönüştürücü ile doğrudan temas hâlindeki biyolojik bir tanıma elemanı (enzim, antikor, nükleik asit, peptit veya hücre) içermelidir (Thévenot, Toth, Durst ve Wilson, 2001). Bu bölümde, bu tanıma uyan ve karmaşık fizyolojik örneklerde test edilmiş giyilebilir biyosensörlere özel bir vurgu yapılmakta; biyolojik reseptör içermeyen ancak literatürde sıklıkla biyosensör olarak anılan enzimatik olmayan sensörler ise ayrıca değerlendirilmektedir (Czopinska, Zaras ve Jarczewska, 2026).

2. Yara İyileşmesinin Biyolojik Temelleri

2.1. Yaraların sınıflandırılması ve iyileşme evreleri

Klinikte en sık kullanılan ayrımlar, iyileşme süresine göre akut ve kronik yaralar ile deri bütünlüğünün bozulup bozulmamasına göre açık ve kapalı yaralardır (Yazarlu vd., 2021). Akut yaralar öngörülebilir bir zaman çizelgesi içinde düzenli iyileşme evrelerinden geçerek kapanır; kronik yaralar ise bu evreleri olağan sırayla tamamlayamaz ve genellikle inflamasyon evresinde takılı kalır (Hossain vd., 2024). İyileşme süreci dört temel evreden oluşur: (1) hemostaz, (2) inflamasyon, (3) proliferasyon ve (4) yeniden şekillenme (remodeling) (Peña ve Martin, 2024). Şekil 1, evrelerin zaman içindeki örtüşmesini ve her evrede öne çıkan biyobelirteçleri özetlemektedir.



Şekil 1. Yara iyileşmesinin dört evresi, her evrenin yaklaşık süresi, temel hücresel olayları ve öne çıkan biyobelirteçleri. Alt bant, iyileşmenin inflamasyon evresinde takılı kaldığı kronik yaraları göstermektedir (Czopinska vd., 2026; Patel, Maheshwari ve Chandra, 2016; Vo ve Trinh, 2025).

Hemostaz. Yaralanmanın hemen ardından başlayan ve birkaç saat sürebilen ilk yanıttır. Kan damarlarının daralması (vazokonstriksiyon) dokulara oksijen ve besin taşınmasını azaltır; hücreler glikolize yönelir ve yara eksüdasının pH'sı değişir (Bodas ve Shinde, 2021). Trombositlerin kümeleşmesi ve koagülasyon kaskadıyla oluşan fibrin pıhtısı kanamayı durdurmakla kalmaz, sonraki evrelerde göç edecek hücreler için geçici bir iskele görevi de görür (H. Wang ve Yang, 2023). Pıhtıdan salınan trombosit kaynaklı büyüme faktörü (PDGF) ve dönüştürücü büyüme faktörü-beta (TGF-β) bağışıklık hücrelerini ve fibroblastları yara yatağına çağırır (Patel vd., 2016).

İnflamasyon. Çoğunlukla ilk 24 saat içinde başlar; akut yaralarda genellikle birkaç gün içinde sönümlenmekle birlikte iki haftaya kadar sürebilir, kronik yaralarda ise çok daha uzun süre devam eder (R. Zhao, Liang, Clarke, Jackson ve Xue, 2016). Bu evrenin ana aktörleri nötrofiller, makrofajlar ve T lenfositlerdir. Nötrofiller elastaz ve kollajenaz salgılar ve fagositoz yapar; makrofajlar ise PDGF gibi büyüme faktörleri ile tümör nekroz faktörü-alfa (TNF-α), interlökin-1 (IL-1) ve interlökin-6 (IL-6) gibi sitokinleri salgılar (Patel vd., 2022). Kontrollü bir inflamatuvar yanıt yaranın dekontaminasyonu için zorunludur; ancak aşırı ya da uzamış inflamasyon iyileşmeyi geciktirir ve kronik yara oluşumuna zemin hazırlar.

Proliferasyon. Yaralanmadan yaklaşık 48 saat sonra başlar ve akut yaralarda yaklaşık 20 güne kadar sürebilir (Flynn, Mahmoud, Sharifi, Gould ve Mahmoudi, 2023). Fibroblastlar kollajen başta olmak üzere hücre dışı matriks bileşenlerini üreterek granülasyon dokusunu oluşturur; endotel hücreleri yeni kılcal ağlar kurar (anjiyogenez), keratinositler ise yara yatağı boyunca göç ederek re-epitelizasyonu sağlar. Fibroblastların matriks içinde ilerlemesi matriks metalloproteinazları (MMP) tarafından kolaylaştırıldığından MMP'ler bu evrenin baskın biyobelirteçleri arasındadır; süreç TGF-β tarafından sıkı biçimde düzenlenir (Patel vd., 2016).

Yeniden şekillenme. Yaranın boyutuna ve tipine bağlı olarak aylar hatta yıllar sürebilir (Spielman vd., 2023). Bu evrede tip III kollajen yerini daha dayanıklı tip I kollajene bırakır, miyofibroblastların aracılık ettiği kontraksiyon yara alanını küçültür ve proliferatif evrede oluşan kapillerler gerilemeye başlar (Potekaev vd., 2021). İnflamatuvar sitokinlerin normal düzeylere dönmesi inflamasyonun çözüldüğünü, MMP düzeylerindeki azalma ise yaranın kapanmakta olduğunu gösterir (Patel vd., 2016).

2.2. Kronik yaralar ve enfeksiyon

Kronik yaralarda aşırı eksüdasyon, tekrarlayan inflamasyon, doku nekrozu ve sınırlı anjiyogenez sık görülür (S. Guo ve DiPietro, 2010). İleri yaş, stres, bazı ilaçlar ve diyabet, venöz yetmezlik ya da ateroskleroz gibi hastalıklar iyileşmeyi olumsuz etkiler (Summer vd., 2024). Kronikleşmenin temel mekanizması, sürecin inflamasyon evresinde takılı kalmasıdır: Sürekli salgılanan IL-6 ve IL-1

gibi sitokinler proteaz aktivitesini artırır, hücre dışı matriks yıkılır ve yara proliferasyon evresine geçemez. Nekrotik doku ise bakterilerin tutunmasını ve biyofilm oluşumunu kolaylaştırır; biyofilm kalıcı enfeksiyonlara yol açarak bağışıklık yanıtını zayıflatır (Patel vd., 2022). Yara mikrobiyotası ile konakçı arasındaki etkileşimler iyileşme bozukluğunun ortaya çıkmasında belirleyici olduğundan (Uberoi vd., 2024), enfeksiyonun klinik belirtiler ortaya çıkmadan saptanması giyilebilir biyosensörlerin en önemli hedeflerinden biridir.

3. Yara İyileşmesinin İzlenmesinde Geleneksel Yöntemler ve Sınırlılıkları

Günümüzdeki standart klinik uygulamalar, yara iyileşmesinin izlenmesinde nicel bir yaklaşımdan yoksundur; rutin yöntem, yaranın deneyimli bir sağlık profesyoneli tarafından görsel olarak değerlendirilmesidir (P. Tan, Lim ve Moiemen, 2021). Bu değerlendirmeyi sistematik hâle getirmek amacıyla önerilen TIME çerçevesi; dokunun canlılığını (tissue), enfeksiyon ve inflamasyon varlığını (infection/inflammation), nem dengesini (moisture) ve yara kenarlarının durumunu (edge) esas alır (Swanson vd., 2022). Yara boyutları için çoğunlukla cetvel kullanılır ya da şeffaf bir ızgara üzerinde kareler sayılır (Hasatsri ve Aramwit, 2017); son yıllarda dijital planimetri ve akıllı ölçüm cihazları da kullanılmaya başlanmıştır (Wu, Wu ve Yu, 2024).

Bu yöntemler uygulanması kolay olsa da kronik yaraların değerlendirilmesinde yetersiz kalır. Örneğin biyofilmin saptanmasına yönelik yöntemler ve biyofilm kültürü genellikle yalnızca belirgin klinik inflamasyon bulguları ortaya çıktığında önerilmektedir (Grey, Enoch ve Harding, 2006; Swanson vd., 2022). Rutinde yapılan mikrobiyolojik kültür invazif olabilir, sonuçlar günler sonra elde edilir ve yalnızca örneğin alındığı andaki mikrobiyomu yansıtır. C-reaktif protein (CRP) gibi sistemik laboratuvar belirteçleri ise yeterince özgül değildir (Patel vd., 2016). Özetle geleneksel yaklaşım öznel, aralıklı ve gecikmeli bilgiye dayanmakta; yara ortamından sürekli ve nicel veri sağlayan yeni izleme yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır (Czopinska vd., 2026; Vo ve Trinh, 2025).

4. Yara İyileşmesi Biyobelirteçleri

Biyobelirteç, organizmada ölçülebilen ve bir hastalığın varlığının ya da sonuçlarının belirlenmesine yardımcı olan her türlü madde, yapı veya süreç olarak tanımlanır (Bodas ve Shinde, 2021). Yara bağlamında biyobelirteçler, iyileşme sürecine ve olası komplikasyonlara ilişkin gerçek zamanlı bilgi sağlayarak yaranın durumunun değerlendirilmesinde ve enfeksiyonun saptanmasında kilit rol oynar (Lindley, Stojadinovic, Pastar ve Tomic-Canic, 2016). Aşağıda yara iyileşmesiyle ilişkili başlıca biyobelirteç grupları, Pusta, Tertiş, Cristea ve Mirel (2022) tarafından önerilen sınıflandırmadan hareketle ele alınmaktadır.

4.1. Fizikokimyasal parametreler

pH. pH; enzim aktivitesini, mikrobiyal çoğalmayı ve iyileşmede rol alan hücresel süreçleri doğrudan etkilediği için en önemli yara parametrelerinden biridir (Jankowska vd., 2017). Sağlıklı deri yaklaşık 4,5–6 aralığında hafif asidik bir pH'ya sahiptir ve bu ortam patojen bakteriler için elverişsizdir (Proksch, 2018). Kronik yaralarda ise pH genellikle 7–9 aralığına yükselir; bazik ortam mikrobiyal çoğalmayı ve biyofilm oluşumunu kolaylaştırarak iyileşmeyi bozar (Percival, McCarty, Hunt ve Woods, 2014). pH eksüdada kolayca ölçülebilmekle birlikte enfeksiyonun erken tanısı için tek başına yeterli değildir ve diğer biyobelirteçlerle birlikte değerlendirilmelidir (Patel vd., 2022; Pusta vd., 2022).

Sıcaklık, nem ve oksijen. Sıcaklık artışı inflamasyon evresine işaret eder; ancak bu durumun uzaması bakteriyel enfeksiyonu ve metabolik aktivitedeki değişiklikleri düşündürür (Y. Zhang vd., 2021). Çevre deriye göre en az 3 °C'lik bir sıcaklık farkı enfeksiyon ve inflamasyonun göstergesi olarak kabul edilirken (Chanmugam vd., 2017), sıcaklık düşüşü kısmi iskemiye işaret edebilir (Patel vd., 2022). Aşırı nem maserasyona ve bakteri üremesine, aşırı kuruluk ise hücre göçünün ve granülasyon dokusu oluşumunun yavaşlamasına yol açar (Nuutila ve Eriksson, 2020). Doku oksijenlenmesi de anjiyogenez, kollajen sentezi ve bakteriyel savunma için belirleyici bir parametredir (Sen, 2009).

4.2. İnflamatuvar belirteçler ve reaktif oksijen türleri

İyileşmeye katılan hücrelerin salgıladığı TNF-α, IL-1 ve IL-6 gibi sitokinler inflamatuvar kaskadları başlatarak yara enfeksiyonunu önlemede kritik rol oynar (Patel vd., 2016). Kronik yaralarda yüksek seyreden sitokin düzeyleri hücre dışı matriksin yıkımına ve hücre göçünün azalmasına neden olur (Patel vd., 2022); bu nedenle sitokin profili normal ve patolojik inflamasyonun ayırt edilmesine yardımcı olur (Mahmoud vd., 2024). CRP ise özgül olmamakla birlikte enfekte yaralarda eksüdaya geçen bir inflamasyon belirtecidir (Salvo vd., 2017). Süperoksit ve hidrojen peroksit gibi reaktif oksijen türleri (ROS) düşük düzeylerde hücre sinyalizasyonuna ve antimikrobiyal savunmaya katkıda bulunurken, aşırı birikimleri dokuya zarar verir ve kronikleşmeyi şiddetlendirir (Wilkinson ve Hardman, 2020). ROS düzeylerini ölçen sensörler oksidatif stresin değerlendirilmesine ve antioksidan tedavilerin yönlendirilmesine yardımcı olabilir (Murphy vd., 2022).

4.3. Enzimler

Kronik yaralarda başta jelatinazlar (MMP-2 ve MMP-9) olmak üzere matriks metalloproteinaz düzeyleri artar; MMP düzeylerindeki azalma ise iyileşmenin düzelmesiyle ilişkilidir (J. Chen vd., 2023; Patel vd., 2016). Nötrofil kaynaklı miyeloperoksidaz ve elastaz ile lizozim gibi enzimler de inflamatuvar aktivitenin ve bakteriyel enfeksiyonun göstergeleri arasındadır (W. Lin vd., 2024; Park vd.,

2025; Xiao vd., 2021). Bakterilere özgü lipaz ve hiyalüronidaz gibi enzimlerin izlenmesi ise etkenin türü hakkında ipucu verebilir (Tegl vd., 2015).

4.4. Metabolitler ve bakteriyel ürünler

Pürin metabolizmasının son ürünü olan ürik asit (ÜA), yara eksüdasında oksidatif stres ve inflamasyonla ilişkili olarak yükselir ve yaranın şiddetiyle korelasyon gösterir (Fernandez, Upton, Edwards, Finlayson ve Shooter, 2012). Laktat doku oksijenlenmesinin ve enfeksiyonun, glukoz ise özellikle diyabetik hastalarda iyileşme gecikmesinin göstergesidir (Burgess vd., 2021; Haller vd., 2021). Bakteriyel metabolizmanın uçucu bir ürünü olan trimetilamin (TMA) anaerobik bakteri aktivitesi ve biyofilm oluşumu ile ilişkilendirilmektedir (X. T. Zheng vd., 2023). *P. aeruginosa*'nın redoks aktif virülans faktörü olan piyosiyanin ve *S. aureus*'un yüzey enzimi olan sortaz A yalnızca enfekte yaralarda bulunduğundan, etkene özgü tanı için son derece değerli hedeflerdir (Shi vd., 2023; J. Zhang vd., 2025).

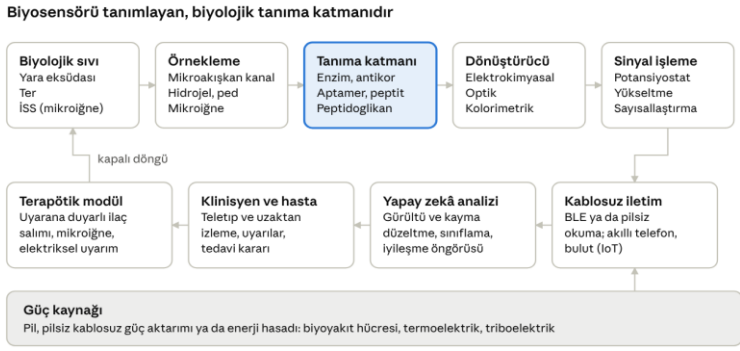
5. Biyosensörler ve Giyilebilir Sensörler

5.1. Biyosensör kavramı ve sınıflandırma

Biyobelirteçlerin gerçek zamanlı ve hassas biçimde izlenmesi için en güçlü araçlardan biri biyosensörlerdir. Bir biyosensörün reseptör (tanıma) katmanı enzimler, antikorlar ve diğer proteinler, nükleik asitler (aptamerler dâhil), peptitler ya da hücreler gibi biyomoleküllerden oluşur (Chinnappan vd., 2025). Biyosensörler tanıma mekanizmasına göre katalitik (ör. enzim temelli) ve afinite (ör. antikor ya da aptamer temelli) biyosensörler; dönüştürücü tipine göre ise elektrokimyasal, optik ve kütle duyarlı biyosensörler olarak sınıflandırılır (Naresh ve Lee, 2021). Kısa analiz süresi ve çok küçük örnek hacimleriyle çalışabilmeleri, onları hasta başı (point-of-care, POC) tanı için uygun kılar.

5.2. Giyilebilir sensörlerin yapı taşları

Giyilebilir sensörler POC özelliklerini kablosuz veri iletimiyle birleştirir; dövme benzeri yamalar, eldivenler, tekstiller ve implantlar biçiminde üretilebilir ve vücutla ya da vücut sıvılarıyla doğrudan temas hâlinde çalışırlar (Kim, Campbell, de Ávila ve Wang, 2019). Tipik bir giyilebilir biyosensör beş temel bileşenden oluşur: (1) örnek toplama elemanı (mikroakışkan kanal, hidrojel ya da gözenekli ped), (2) reseptör katmanı, (3) sinyal dönüştürme ve iletim elemanı, (4) veri depolama birimi ve (5) güç kaynağı (Czopinska vd., 2026). Şekil 2 bu bileşenleri ve aralarındaki veri akışını göstermektedir. Son yıllarda tanıma işlevi ile ilaç salım sisteminin tek bir cihazda birleştirildiği teranostik örnekler de geliştirilmiştir (M. Tan vd., 2022).



Şekil 2. Giyilebilir bir yara biyosensörünün yapı taşları ve veri akışı. Üst sıra, biyolojik sıvıdan sayısal sinyale uzanan algılama zincirini; alt sıra, verinin iletimi, analizi ve kapalı döngü tedaviye dönüşümünü gösterir. Vurgulanan tanıma katmanı, bir cihazı kimyasal sensörden ayıran biyolojik bileşendir. İSS: interstisyel sıvı; BLE: Bluetooth Düşük Enerji (Czopinska vd., 2026; Vo ve Trinh, 2025).

5.3. Algılama modaliteleri

Yara izlemesinde kullanılan giyilebilir sensörler başlıca elektrokimyasal, optik ve kolorimetrik sensörler olarak üç sınıfta toplanır (Mota, Passos, Santos ve Saraiva, 2024; Vo ve Trinh, 2024).

Elektrokimyasal sensörler. Yüksek duyarlılık ve seçicilik, düşük tayin sınırı ve minyatürleştirmeye uygunluk nedeniyle alanın baskın sınıfını oluşturur (Mahato ve Wang, 2021). Hedef analitin elektrot yüzeyiyle etkileşiminden doğan elektriksel sinyal; amperometri, dönüşümlü voltametri (CV), diferansiyel puls voltametrisi (DPV), açık devre potansiyeli (OCP) ve potansiyometri gibi tekniklerle izlenir (S. Li vd., 2023). Grafen ve karbon nanotüpler gibi karbon temelli malzemeler, altın ve platin gibi soy metaller ve polianilin ile polipirol gibi iletken polimerler yaygın elektrot malzemeleridir (Fritea vd., 2021). Nanoyapılandırma ve biyomoleküllerle işlevselleştirme ise aktif bölge sayısını ve elektron aktarım verimini artırarak performansı iyileştirir (Macovei, Irimes, Hosu, Cristea ve Tertis, 2023). Bu sayede yara izlemesinde kullanılan pH sensörlerinde 0,01 pH birimine kadar inen çözünürlükler (Salvo vd., 2017), laktat biyosensörlerinde 2,9 $\mu A\ mM^{-1}\ cm^{-2}$ düzeyinde duyarlılıklar (Koklu vd., 2022) ve IL-6 için organik elektrokimyasal transistör temelli aptasensörlerde çok düşük tayin sınırları (Diacci vd., 2024) elde edilmiştir.

Optik ve kolorimetrik sensörler. Optik sensörler floresans, absorbans veya yansıma ölçümleriyle çalışır; örneğin floresans temelli sensörler inflamatuvar belirteçleri ve ROS'u yüksek doğrulukla algılayabilir (Mota vd., 2024). Duyarlılıkları yüksek olmakla birlikte elektrokimyasal sensörlere göre daha karmaşık ve maliyetli olmaları yaygın kullanımlarını sınırlamaktadır. Kolorimetrik sensörler ise belirli bir biyobelirtecin varlığını ya da derişimini renk

değişimiyle gösteren basit ve düşük maliyetli araçlardır (Krishnan, 2022). Örneğin pH'ya duyarlı bir kolorimetrik yama, bazik yara ortamında sarıdan maviye dönerek olası bir enfeksiyonu gösterebilir (Tang vd., 2021). Akıllı telefon kamerasıyla yapılan görüntü analizi nicelleştirmeye olanak tanısa da (Clemente vd., 2023) yarı nicel doğaları karmaşık klinik durumlarda kullanımlarını kısıtlar. Birden fazla algılama ilkesini birleştiren hibrit sistemler bu sınıfların üstünlüklerini bir araya getirmeyi amaçlamaktadır (Mahato vd., 2024).

6. Giyilebilir Sensörlerde Kullanılan Malzemeler ve Tasarım Yaklaşımları

Deriye ya da doğrudan yaraya uygulanacak sensörlerde kullanılan malzemeler biyouyumlu, toksik olmayan ve korozyona dayanıklı olmalı; ayrıca yeterli geçirgenliğe ve dokuya uyum sağlayabilmek için düşük Young modülüne sahip olmalıdır (Bandodkar ve Wang, 2014). Son yıllarda esnek ve gerilebilir malzemeler, mikroiğneler ve üç boyutlu (3B) baskı alanındaki ilerlemeler giyilebilir sensörlerin hem performansını hem de kullanım kolaylığını belirgin biçimde artırmıştır (Ali, Hu, Yttri ve Panat, 2022).

6.1. Polimerler, hidrojeller ve tekstiller

Polidimetilsiloksan (PDMS), polietilen tereftalat (PET) ve poliimid (PI) esneklikleri sayesinde sensör substratı olarak, polianilin (PANI) ve polipirol (PPy) ise elektrot ve dönüştürücü malzemesi olarak yaygın biçimde kullanılır (C. Wang vd., 2022). Bununla birlikte bu polimerlerin sınırlılıkları da vardır: PDMS'nin mekanik dayanımı düşüktür, PET'in işlevselleştirilmesi sınırlıdır, PI'nin biyouyumluluğu zayıftır ve PANI'nin esnekliği yetersizdir (Ahmad Tarar, Mohammad ve Srivastava, 2020).

Hidrojeller, gözenekli yapıları deri ile sensör arasındaki madde taşınımını kolaylaştırdığı ve şiştikten sonra bile yapılarını koruyabildikleri için sensör üretiminde sıklıkla kullanılır (Nan vd., 2022). Mekanik özellikleri ayarlanarak doğal hücre dışı matriksi taklit edebilirler (Gu, Sun, Bao, Feng ve Chen, 2025); zayıf mekanik dayanım, sınırlı kullanım ömrü ve kontaminasyon riski ise başlıca dezavantajlarıdır (Chenani vd., 2024). Yün, pamuk ve naylon gibi tekstiller yeterli geçirgenlik ve düşük üretim maliyeti sunmalarının yanı sıra cihazın giysilerle fark edilmeden bütünleştirilmesine olanak tanır (Hosseinzadeh Fakhr vd., 2024). Tamamen tekstil temelli organik elektrokimyasal transistörlerle yara eksüdasında ürik asidin gerçek zamanlı izlenmesi bu malzeme sınıfının potansiyelini gösteren bir örnektir (Arcangeli vd., 2023).

6.2. Elektrot malzemeleri, mikroiğneler ve 3B baskı

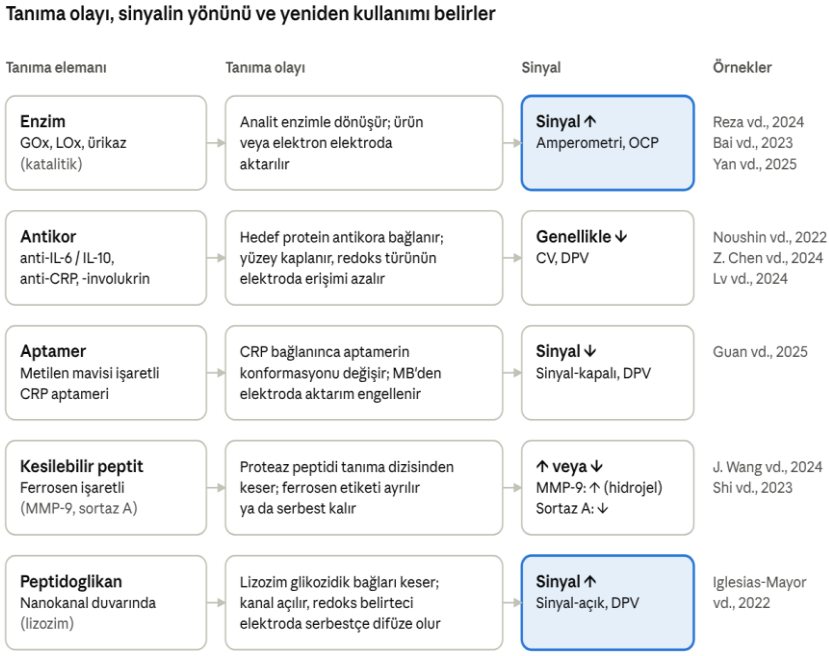
Elektrotlar çeşitli desenlerde baskı teknikleriyle (özellikle serigrafi baskı) üretilip ardından nanomalzemeler ya da biyolojik bileşenlerle modifiye edilebilir (Suresh vd., 2021). Altın ve karbon elektrotların yanı sıra grafen, karbon nanotüpler ve MXene'ler, elektron aktarımını verimli hâle getiren geniş yüzey

alanları sayesinde duyarlılığı artırır. Bu malzemelerin başlıca sınırlılıkları ise kimyasal ve termal kararsızlık, tekrarlanabilirlikteki değişkenlik, entegrasyondaki güçlükler ve olası toksisitedir (Jayathilaka vd., 2019).

Mikroiğne temelli biyosensörler, derinin yalnızca üst katmanlarına nüfuz ederek interstisyel sıvıya belirgin ağrı ya da hasar oluşturmadan erişen minimal invaziv bir yaklaşımdır (X. Zhang vd., 2024). Glukoz, sitokinler ve laktat gibi biyobelirteçlerin doğrudan ölçümüne olanak tanımalarının yanı sıra ilaç salım sistemleriyle birleştirilerek kapalı döngü tedavi için çift işlevli tasarımlar da sunarlar (Z. Zheng, Zhu, Peng, Xu ve Jiang, 2024). 3B baskı gibi eklemeli üretim teknikleri ise sensörlerin belirli bir yara tipine veya anatomik bölgeye göre kişiselleştirilmesine imkân tanır (Astaneh ve Fereydouni, 2024).

7. Yara İyileşmesinin İzlenmesine Yönelik Güncel Giyilebilir Biyosensör Örnekleri

Bu kısımda, 2021–2025 yılları arasında yayımlanan ve yara iyileşmesi biyobelirteçlerini hedefleyen giyilebilir biyosensörler incelenmektedir. Seçimde iki ölçüt esas alınmıştır: Sensörün biyolojik bir tanıma elemanı içermesi (yani IUPAC biyosensör tanımına uyması) ve karmaşık fizyolojik örneklerde ya da hayvan modellerinde test edilmiş olması (Czopinska vd., 2026). Çok parametreli platformlarda yalnızca biyolojik reseptör içeren algılama kanallarının biyosensör olarak nitelendirilebileceği vurgulanmalıdır. Şekil 3, aşağıda ele alınan örneklerde kullanılan başlıca tanıma ve sinyal üretim stratejilerini özetlemektedir.



Şekil 3. Bu bölümde incelenen elektrokimyasal biyosensörlerde kullanılan tanıma elemanları, tanıma olayının sinyale dönüşüm mekanizması ve sinyalin yönü. Sinyal artışıyla ("sinyal-açık") çalışan sistemler vurgulanmıştır. Peptit kesimi ve peptidoglikan yıkımı gibi geri dönüşümsüz tanıma reaksiyonlarına dayanan biyosensörler tek kullanımlıktır. GOx: glukoz oksidaz; LOx: laktat oksidaz; MB: metilen mavisi; OCP: açık devre potansiyeli (Czopinska vd., 2026).

7.1. Çok parametreli metabolit platformları

Reza vd. (2024) glukoz, laktat ve ürik asit gibi metabolitleri, Na^+ ve K^+ iyonlarını, pH'yı ve sıcaklığı eş zamanlı olarak ölçen, mikroakışkan sistemle bütünleşik, esnek ve çok modlu bir biyoalgılama yaması geliştirmiştir. Sıcaklık ve pH artışı enfeksiyonun, Na^+ artışı veya K^+ azalması aşırı inflamatuvar yanıtın, yüksek ÜA düzeyi ise inflamasyonun göstergesi olarak yorumlanmıştır. Platformun biyosensör niteliğindeki glukoz, laktat ve ÜA kanallarında dönüştürücü, altın elektrot üzerine indirgenmiş grafen oksit/altın nanotel nanokompoziti (rGO@AuNW) ve platin nanopartiküller uygulanarak hazırlanmış; ilgili enzim (glukoz oksidaz, ürikaz veya laktat oksidaz) kitosanla birlikte EDC/NHS kimyası ile immobilize edilmiştir. Yaranın oluşturulmasından 1, 2 ve 4 gün sonra yapılan ölçümlerde metabolit düzeylerindeki değişimler iyileşme sürecinden beklenenlerle uyumlu bulunmuştur.

Y. Liu vd. (2025) pH, ürik asit ve glukozu izleyen pilsiz, kablosuz ve mikroiğne temelli bir biyoelektronik sistem önermiştir; ancak bunlardan yalnızca glukoz sensörü immobilize enzim içeren gerçek bir biyosensördür, ürik asit ise

enzim yerine rGO/altın nanopartikül nanokompoziti ile DPV kullanılarak ölçülmüştür. Sıçan yarasında yedi gün boyunca pH'da artış, glukoz ve ÜA düzeylerinde ise azalma gözlenmiş ve bu tablo olağan bir iyileşme seyri olarak yorumlanmıştır.

Bai vd. (2023) ise doğal keçi derisinden türetilmiş bir organohidrojel (SGC@MA-Gel) üzerine kurulu, ürik asit, glukoz ve pH'yı ölçen pilsiz ve kablosuz bir platformla sıçan yarasını 10 gün boyunca izlemiştir. Sıçanlara glukoz verildiğinde yara sıvısındaki glukoz düzeyinin yükselmesi, aç bırakıldıklarında ise düşmesi, yalnızca glukoz ölçümüne dayanan bir sensörün sınırlılığını açıkça ortaya koymaktadır: Açlığa bağlı düşüş yanlışlıkla iyileşme olarak yorumlanabilir. Dolayısıyla glukoz özgül olmayan bir yara biyobelirtecidir ve diğer belirteçlerle birlikte değerlendirilmelidir (Czopinska vd., 2026).

7.2. Sitokin immünosensörleri: IL-6 ve IL-10

Proinflamatuvar IL-6 iyileşmenin erken inflamatuvar evresinin karakteristik bir göstergesidir ve aşırı ve uzun süreli varlığı kronik yaraların özelliğidir. Antiinflamatuvar IL-10 ise iyileşmenin geç evrelerinde ortaya çıkar; proinflamatuvar sitokinlerin üretimini baskılar, anjiyogenezi ve yeniden şekillenmeyi destekler. Bu iki sitokinin birlikte izlenmesi iyileşme evresinin belirlenmesine olanak tanır (Mahmoud vd., 2024).

Noushin, Hossain ve Tabassum (2022) bu amaçla IL-6 ve IL-10'u yara bölgesinde çoklu olarak izleyen, Nesnelerin İnterneti (IoT) özellikli bir akıllı yara sensörü geliştirmiştir. Grafen çalışma elektrotlu serigrafi baskı platformlara redoks mediyatörü olarak Prusya mavisi biriktirilmiş, elektrotlar altın nanopartiküllerle süslenmiş çok duvarlı karbon nanotüplerle (AuNP-MWCNT) modifiye edilmiş ve reseptör olarak IL-6 ile IL-10'a karşı antikorlar kullanılmıştır. CV ile her iki sitokin için 0,1–1000 pg/mL doğrusal aralık ve sırasıyla 9×10^{-3} ve $7{,}76 \times 10^{-3}$ pg/mL tayin sınırları bildirilmiştir; bu duyarlılık IL-6 için yaklaşık 2,4 pg/mL olan klinik eşiğin oldukça altına inebilmektedir. Bükülmenin sensör performansına etkisi test edilmiş, ancak in vivo deney gerçekleştirilmemiştir.

7.3. C-reaktif protein (CRP) biyosensörleri

CRP enfekte yaralarda eksüdaya geçtiğinden, saptanması tedavinin başlatılması için bir sinyal olarak kullanılabilir. **Z. Chen vd. (2024)** pH, ürik asit ve CRP düzeylerini birlikte izleyen çok kanallı, giyilebilir bir algılama sistemi geliştirmiştir. Platformun yalnızca CRP kanalı biyosensör niteliğindedir; burada anti-CRP antikorları reseptör olarak kullanılmış ve DPV ile 1–1000 ng/mL aralığında ölçüm yapılmıştır. Ürik asit ise azotla katkılanmış grafen ve platin nanopartikül kompoziti (N-Gr/PtNP) ile enzimsiz olarak ölçülmüştür. *Escherichia coli* ile enfekte edilmiş sıçan yarasından 48 saat sonra toplanan eksüdada CRP saptanabilmiştir.

CRP, antikor yerine aptamer reseptörlerle de saptanabilir. **Guan vd. (2025)** PDMS substrat üzerine basılan ötektik galyum–indiyum temelli bir elektrodu (EGaIn-PPD@Au), 5′ ucunda metilen mavisi (MB) redoks etiketi taşıyan bir CRP aptameriyle modifiye etmiştir. CRP bağlandığında aptamerin konformasyonu değişir ve elektron aktarımı engellenerek sinyal azalır ("sinyal-kapalı" mekanizması). Sensör 0–50 mg/L aralığında yanıt vermiş ve tayin sınırı 0,5 mg/L olarak bildirilmiştir. Deri yaması *S. aureus* ile enfekte sıçan yarasında terapötik etki göstermiş; ancak sıçan yaralarında CRP ölçümü yapılmamıştır (Czopinska vd., 2026).

7.4. İnvolukrin biyosensörü

İnvolukrin, epidermal farklılaşmanın ve kornifiye zarf oluşumunun başlangıcını gösteren bir proteindir; derişimindeki artış düzgün bir iyileşmeyi gösterirken artışın görülmemesi tedaviye başlanması için bir sinyal olabilir (Schmidt, 2022). **Lv vd. (2024)** involukrini yara eksüdasında güvenilir biçimde ölçmek için okside bakteriyel selüloz ve kuaternize kitosandan (OxBC/QCS) oluşan, biyokirlenmeye dirençli bir hidrojel üzerine anti-involukrin antikoru immobilize ederek elektrokimyasal bir biyosensör geliştirmiştir. Yapay yara eksüdasında DPV ile 1 pg/mL–1 µg/mL doğrusal aralık ve 0,45 pg/mL tayin sınırı elde edilmiştir. Hidrojelin *E. coli* ve *S. aureus*'a karşı antibakteriyel etkisi de gösterilmiş, ancak in vivo deney yapılmamıştır.

7.5. MMP-9 biyosensörü

MMP-9 düzeylerinin yüksekliği kronik yara oluşumuyla ilişkili olduğundan, MMP-9'un aşırı ekspresyonu tedavinin başlatılması için bir sinyal olarak değerlendirilebilir (Chinnappan vd., 2025). **J. Wang, Zhang, Hu, Hu ve Ma (2024)** ferrosen ile aşılanmış karboksimetil kitosan ve aldehitle modifiye dekstrandan oluşan bir hidrojel ağına, MMP-9 tarafından kesilebilen ve ferrosenle işaretlenmiş bir peptit (Fc-MG) yerleştirmiştir. MMP-9 peptidi kestiğinde redoks aktif ferrosen serbest kalır ve DPV ile ölçülen sinyal büyür ("sinyal-açık" mekanizması). Tayin sınırları PBS'de 73,08 ng/mL, hücre kültürü ortamında 131,71 ng/mL olarak bildirilmiştir. Makrofaj kültürü örneklerinde ölçülen MMP-9 derişimleri ELISA'nınkinden belirgin biçimde düşük, buna karşın standart sapmalar daha küçük bulunmuş; in vivo çalışma yapılmamıştır.

7.6. Bakteriyel virülans faktörlerinin saptanması

Genel inflamasyon belirteçlerinden farklı olarak bakteriyel virülans faktörleri yalnızca enfekte yaralarda bulunur ve etkenin türüne özgüdür. **Shi vd. (2023)** Gram pozitif *Staphylococcus aureus* ve Gram negatif *Pseudomonas aeruginosa* enfeksiyonlarının belirteçleri olan sortaz A ve piyosiyanini algılayan, MXene temelli, pilsiz ve giyilebilir bir akıllı bandaj geliştirmiştir; böylece tedavi saptanan bakteri türüne göre hedefe yönelik biçimde planlanabilmektedir. Sortaz A tayininde ferrosenle işaretlenmiş Fc-LPETGC peptidi kullanılmıştır: Enzim

peptidi treonin ile glisin arasından keser, redoks etiketi yüzeyden ayrılır ve ölçülen akım azalır. Elektrokimyasal olarak aktif olan piyosiyanin ise ek bir etiket olmadan doğrudan ölçülmüştür. Yapay yara eksüdasında sortaz A için 1–100 ng/mL, piyosiyanin için 0–100 μM doğrusal aralık bildirilmiş ve analitler sıçan yaralarında in vivo olarak saptanmıştır. Piyosiyanin kanalı sürekli izlemeye uygun olsa da peptit kesildiği için sortaz A biyosensörü tek kullanımlıktır.

Piyosiyanin, *P. aeruginosa* enfeksiyonunun en çok çalışılan belirteçlerinden biridir. Esnek karbon ultramikroelektrot dizileriyle simüle yara ortamında piyosiyanin, ürik asit ve nitrik oksitin eş zamanlı tayini yapılmış ve gümüş iyonlarının *P. aeruginosa* tarafından piyosiyanin salgılanmasını azalttığı izlenebilmiştir (Simoska, Duay ve Stevenson, 2020). Çok duvarlı karbon nanotüp/PVA hidrojelle modifiye sensörlerle piyosiyanin ex vivo ve in vivo koşullarda saptanmış (Thirabowonkitphithan, Phuengmaung, Leelahavanichkul ve Laiwattanapaisal, 2023), Cu-BTC metal–organik çerçevesine dayanan giyilebilir ve kablosuz bir cihaz ise piyosiyanin tayinini yara iyileştirme işleviyle birleştirmiştir (J. Zhang vd., 2025). Bu örnekler enzimatik olmayan doğrudan tayine dayandıklarından katı anlamda biyosensör değildir; ancak etkene özgü tanı stratejisinin gücünü göstermektedir.

7.7. Lizozim: nanokanal temelli biyosensör

Lizozim bakteri hücre duvarındaki peptidoglikanın glikozidik bağlarını hidrolize eder; dolayısıyla düzeyindeki artış vücudun bakteriyel enfeksiyona karşı savunma yanıtını yansıtır (Xiao vd., 2021). **Iglesias-Mayor vd. (2022)** duvarları peptidoglikanla kaplanmış ve tabanına elektrot yerleştirilmiş nanokanallara dayanan özgün bir yaklaşım geliştirmiştir. Başlangıçta peptidoglikan zincirleri kanalları tıkar; lizozim bu zincirleri kestiğinde kanallar açılır ve $[Fe(CN)_6]^{3-/4-}$ redoks belirteci elektrot yüzeyine difüze olarak sinyal üretir. Hastalardan toplanan yara eksüdalarında cihaz temiz ülser örneklerini enfekte olanlardan ayırt edebilmiş ve sonuçlar ELISA ile uyumlu bulunmuştur (tayin sınırı 280 ng/mL). Kesilen peptidoglikan zincirleri yenilenemediğinden biyosensör yalnızca bir kez kullanılabilir.

7.8. Biyoelektronik sütürler

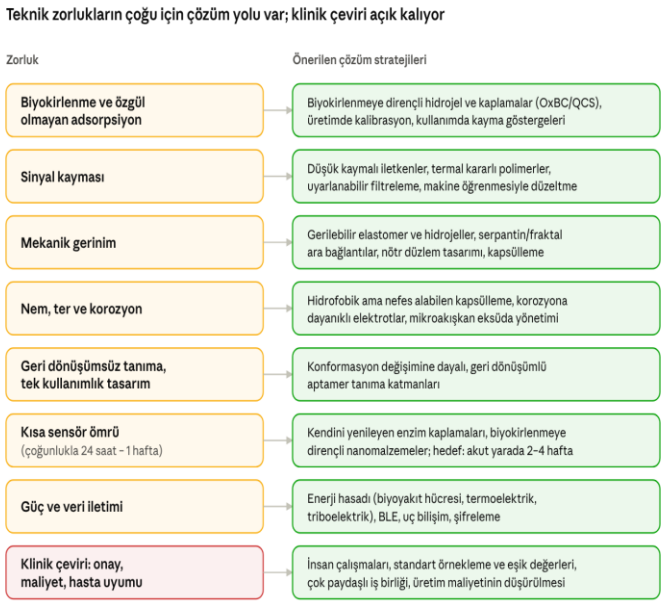
İlgi çekici bir başka yaklaşım, reseptör katmanını doğrudan cerrahi sütürlere yerleştirmektir. **Yan vd. (2025)** yara bölgesinde glukozu izleyen elektrokimyasal biyoelektronik sütürler geliştirmiştir. Glukoz oksidaz ve elektron mediyatörü olarak tetratiyafulvalen (TTF) ile kaplanmış anot lifi, platin nanopartiküllerle donatılmış katot lifiyle sarılarak bir lif biyoyakıt hücresi oluşturulmuş ve algılamada OCP kullanılmıştır. Sıçanlarda sütürle ölçülen yara glukoz düzeyleri (1–16 mM) ticari bir glukometreyle elde edilen değerlerle karşılaştırılabilir bulunmuştur. Ek bir yamaya gerek kalmaması ve biyoyakıt hücresi ilkesinin sensörün kendi enerjisini üretmesine olanak tanıması bu çözümün başlıca üstünlükleridir.

7.9. Enzimatik olmayan (biyomimetik) sensörler

Aşağıdaki örnekler biyolojik bir reseptör katmanı içermediğinden katı anlamda biyosensör tanımını karşılamaz; ancak literatürde sıklıkla "(biyo)sensör" olarak anılmakta ve enzim kararsızlığı sorununa alternatif çözümler sunmaktadır (Czopinska vd., 2026). **Thirabowonkitphithan vd. (2024)** altın nanopartikül katkılı PEDOT:PSS/polivinil alkol hidrojel kompozitine dayanan, enzimatik olmayan, kablosuz bir ürik asit sensörü geliştirmiştir. Cihaz 35 insan serumu ve 5 yara eksüdası örneğinde test edilmiş ve tıbbi laboratuvar ölçümleriyle anlamlı bir fark saptanmamıştır. **X. Wang vd. (2023)** ise enzim yerine fenilboronik asidin (PBA) glukozu tanıdığı, karbon nanotüp ve PEDOT:PSS içeren çift iletkenli bir kompozitle amperometrik olarak 0,2–2 mM aralığında yanıt almış; ancak in vivo test yapmamıştır.

8. Zorluklar ve Sınırlılıklar

pH, metabolitler ve çeşitli yara biyobelirteçlerini algılayabilen çok sayıda elektrokimyasal biyosensör bildirilmiş olsa da (Nasiri ve Khosravani, 2020), bunların in vivo koşullarda güvenilir biçimde çalışmasını engelleyen pek çok sorun hâlâ çözülmeyi beklemektedir. Şekil 4 bu zorlukları ve önerilen çözüm stratejilerini özetlemektedir.



Şekil 4. Giyilebilir yara biyosensörlerinin başlıca zorlukları ve literatürde önerilen çözüm stratejileri. Teknik zorlukların çoğu için somut malzeme ve tasarım çözümleri bulunurken, klinik çeviri (insanda doğrulama, düzenleyici onay, maliyet) en büyük açık sorun olmayı sürdürmektedir (Czopinska vd., 2026).

8.1. Analitik zorluklar: arka plan sinyali, biyokirlenme ve seçicilik

En önemli güçlüklerden biri, proteinler, hücreler ve iyonlar gibi yara eksüdası bileşenlerinin algılama katmanına özgül olmayan biçimde adsorplanmasından kaynaklanan ve yanlış pozitif sonuçlara yol açabilen yüksek arka plan sinyalleridir (Czopinska vd., 2026). Biyokirlenme olarak adlandırılan bu süreç sensör performansını zamanla düşürdüğünden yüzeyin biyokirlenmeye dirençli kaplamalarla modifiye edilmesi gerekir (Lv vd., 2024). Hedef dışı moleküllerin yarattığı girişim seçiciliğin artırılmasını zorunlu kılarken (S. Chen vd., 2023), erken evre enfeksiyonun saptanması için gereken duyarlılık çoğunlukla karmaşık sensör mimarileri veya nanomalzemelerle sağlandığından maliyeti artırır (S.-W. Huang, Wu, Ahmed, Pan ve Cheng, 2024).

8.2. Tek kullanımlık tasarımlar ve geri dönüşümsüz tanıma

Günümüz yara sensörlerinin önemli bir kısmı tek kullanımlıktır; kalibrasyon ve periyodik değişim gerektirmeleri hastanın yükünü ve maliyeti artırır. Mevcut cihazların çoğu pH'ya ya da düşük molekül ağırlıklı analitlere odaklanmaktadır (Nasiri ve Khosravani, 2020). Giyilebilir afinite biyosensörlerinin azlığı büyük ölçüde pek çok tanıma reaksiyonunun geri dönüşümsüz olmasından kaynaklanır (Min, Sempionatto, Teymourian, Wang ve Gao, 2021). Konformasyon değişimine dayalı, geri dönüşümlü bağlanma gösteren aptamer temelli tanıma katmanları bu sorunun aşılmasında umut verici bir yol olarak görülmektedir (Czopinska vd., 2026).

8.3. Malzeme, mekanik ve çevresel zorluklar

Yara örtülerine entegre edilen biyosensörler alerjik, inflamatuvar veya sitotoksik reaksiyonlara yol açmamalı; hastanın hareketi sırasında maruz kaldıkları bükülme, gerilme ve sıkışmaya karşın ayrılmadan ve sinyal bütünlüğünü kaybetmeden çalışmalıdır (Xu, Obodo ve Yadavalli, 2019). Uzun dönem malzeme kararsızlığı, sıcaklık ve nem değişiklikleri, hidrojel örtülerin şişmesi ve enzimatik bozunma sinyal kaymasına neden olur; termal olarak kararlı polimerler, uyarlanabilir filtreleme ve makine öğrenmesi temelli kayma düzeltmesi önerilen çözümler arasındadır (Del Chicca vd., 2025). Aşırı gerinim elektrot filmlerinde çatlaklara ve mikroakışkan kanallarda bozulmaya yol açabildiğinden doğası gereği gerilebilir malzemeler, serpantin ara bağlantılar ve nötr düzlem mühendisliği önerilmektedir (Luo vd., 2025). Yüksek nem, iyonik sıvılar ve değişken pH ise korozyona ve sinyal artefaktlarına neden olabilir; nefes alabilen hidrofobik kapsülleme ve eksüda yönetimi için mikroakışkan kanallar uzun dönem kararlılık için giderek önem kazanmaktadır (Brothers vd., 2019).

8.4. Sensör ömrü

Elektrokimyasal sensörler elektrot malzemesine ve enzim kaplamasına bağlı olarak birkaç günden bir haftaya, optik sensörler ise birkaç haftaya kadar çalışabilir; kolorimetrik sensörlerin ömrü ise geri dönüşümsüz kimyasal

reaksiyonlar nedeniyle 24–72 saatle sınırlıdır (Z. Li, Askim ve Suslick, 2019). Oysa hedeflenen sensör ömrü yara iyileşmesinin süresiyle uyumlu olmalıdır: Akut yaralar için tipik olarak 2–4 hafta, kronik yaralar için aylar. Bu hedefe ulaşmak için kendini yenileyebilen enzim kaplamaları, biyokirlenmeye dirençli nanomalzemeler ve enerji farkındalığı olan sensör tasarımları gibi atılımlara ihtiyaç vardır (Yin vd., 2024).

8.5. Güç ve enerji yönetimi

Güç ve enerji yönetimi, özellikle kendi kendine güç üreten ve pilsiz sistemlerin geliştirilmesinde giyilebilir biyosensörlerin en büyük sorunlarından biridir (X. Zeng, Peng, Fan ve Lin, 2022). Vücut hareketlerinden ya da terden hasat edilen enerji, gerçek zamanlı veri işleme ve iletim gerektiren sensörleri sürekli besleyemeyebilir (Shen, Li, Yu ve Ding, 2017); pilsiz sistemler ise enerji depolama ve iletim sorunlarıyla karşı karşıyadır (Moloudian vd., 2024). Küçük piller ya da enerji depolama birimleri ise cihaza belirgin ağırlık ve hacim eklemeden uzun çalışma süresi sağlayamayabilir; bu da hasta konforunu ve sensör etkinliğini olumsuz etkiler (Gao vd., 2024). Yara örtülerinde sık pil değişimi pratik olmadığından, deri sıcaklık gradyanından yararlanan termoelektrikler, triboelektrik ya da piezoelektrik jeneratörler ve eksüda metabolitleriyle çalışan biyoyakıt hücreleri önem kazanmaktadır; bunların ince film süperkapasitörlerle birleştirildiği hibrit yaklaşımlar sürekli algılama için en güvenilir enerji kaynağını sunabilir (Z. Lou, Li, Wang ve Shen, 2017).

9. Gelecek Perspektifleri

9.1. Biyoemilebilir sensörler

Biyoemilebilir sensörler, zamanla vücutta bozunacak ve çıkarılmalarına ya da değiştirilmelerine gerek kalmayacak biçimde tasarlanır (La Mattina, Mariani ve Barillaro, 2020). Polilaktik asit, ipek fibroini veya diğer biyobozunur polimerlerden üretilen bu sensörler yara bölgesine yerleştirilebilir ve geride yabancı madde bırakmadan iyileşmeyi izleyebilir (Deng, Gould ve Ali, 2022). Güncel bir örnek, tüp mide ameliyatı sonrasında gastrik kaçağın erken saptanması için geliştirilen biyoemilebilir, kablosuz ve pasif pH sensörüdür (S. Li vd., 2024). pH'ya duyarlı bir hidrojelle kaplı indüktör ve kapasitörden oluşan bu rezonans devresinde hidrojelin pH'ya bağlı şişmesi rezonans frekansını değiştirir ve bu değişim vücut dışından kablosuz bir okuyucuyla izlenir; cihaz görevini tamamladıktan sonra vücutta tamamen emilir. İç organlar için tasarlanmış olsa da bu mimari, yara yatağına yerleştirilebilecek pilsiz ve emilebilir sensörler için açık bir model sunmaktadır.

9.2. Çoklu biyobelirteç platformları

Tek bir biyobelirteç yaranın karmaşık biyolojisini yansıtmakta yetersiz kalır. Bu nedenle inflamatuvar sitokinleri, pH'yı, sıcaklığı ve bakteriyel metabolitleri eş zamanlı olarak ölçen çoklu biyobelirteç platformları yara ortamının bütüncül

bir tanısını sağlayabilir (Arya, Dias, Jelinek, Hadjileontiadis ve Pappa, 2023) ve sağlık profesyonellerinin tedavi stratejilerini gerçek zamanlı olarak değiştirebilmesine olanak tanır (Bhide vd., 2021). Gelecekte metabolitlerin, inflamatuvar proteinlerin ve etkene özgü bakteriyel belirteçlerin (piyosiyanin, sortaz A) aynı örtüde birleştirilmesi; enfeksiyonun varlığını, şiddetini ve etkenini tek bir platformda belirleyebilecek sistemlerin önünü açacaktır.

10. Sonuç

Giyilebilir biyosensörler, pH, sıcaklık, nem ve inflamasyon ile enfeksiyon biyobelirteçleri gibi kritik yara parametrelerinin sürekli ve gerçek zamanlı izlenmesine olanak tanıyarak yara bakımını dönüştürme potansiyeli taşımaktadır. Bu bölümde ele alınan örnekler, enzimatik metabolit sensörlerinden pg/mL düzeyinde sitokin ölçebilen immünosensörlere ve etkene özgü virülans faktörlerini algılayan peptit temelli sistemlere uzanan geniş bir teknolojik yelpazenin hâlihazırda mevcut olduğunu göstermektedir. Esnek ve biyoemilebilir malzemeler, çoklu biyobelirteç algılama sistemleri ve mikrofabrikasyon tekniklerindeki ilerlemeler bu cihazları giderek daha uyarlanabilir ve hasta dostu hâle getirmektedir.

Bununla birlikte biyokirlenme, sinyal kayması, mekanik gerinim ve nem etkileri, tek kullanımlık tasarımlar ve enerji kısıtları başlıca teknik sorunlar; düzenleyici onay, maliyet ve hasta uyumu ise klinik çevirinin önündeki sistemik engellerdir. Literatürdeki biyosensörlerin büyük çoğunluğunun yalnızca tamponda, yapay eksüdada ya da hayvan modellerinde test edilmiş olması, insan çalışmalarındaki açığın kapatılmasının acil bir öncelik olduğunu göstermektedir. Bu engellerin malzeme bilimi, biyoteknoloji, elektronik ve klinik tıp arasındaki disiplinlerarası iş birliğiyle aşılması hâlinde giyilebilir biyosensörler, yara bakımını reaktif bir yaklaşımdan proaktif, hassas ve hasta merkezli bir modele taşıyacaktır.

Kaynakça

Ahmad Tarar, A., Mohammad, U., & Srivastava, S. K. (2020). Wearable skin sensors and their challenges: A review of transdermal, optical, and mechanical sensors. *Biosensors, 10*, 56. doi:10.3390/bios10060056

Ahmed, Z., Mohamed, K., Zeeshan, S., & Dong, X. (2020). Artificial intelligence with multi-functional machine learning platform development for better healthcare and precision medicine. *Database, 2020*, baaa010.

Ali, M. A., Hu, C., Yttri, E. A., & Panat, R. (2022). Recent advances in 3D printing of biomedical sensing devices. *Advanced Functional Materials, 32*, 2107671.

Arcangeli, D., Gualandi, I., Mariani, F., Tessarolo, M., Ceccardi, F., Decataldo, F., . . . Scavetta, E. (2023). Smart bandaid integrated with fully textile OECT for uric acid real-time monitoring in wound exudate. *ACS Sensors, 8*, 1593–1608. doi:10.1021/acssensors.2c02728

Arya, S. S., Dias, S. B., Jelinek, H. F., Hadjileontiadis, L. J., & Pappa, A.-M. (2023). The convergence of traditional and digital biomarkers through AI-assisted biosensing: A new era in translational diagnostics? *Biosensors and Bioelectronics, 235*, 115387.

Astaneh, M. E., & Fereydouni, N. (2024). Silver nanoparticles in 3D printing: A new frontier in wound healing. *ACS Omega, 9*, 41107–41129.

Bai, Z., Wang, X., Huang, M., Feng, Y., Sun, S., Zheng, M., . . . Liu, X. (2023). Smart battery-free and wireless bioelectronic platform based on a nature-skin-derived organohydrogel for chronic wound diagnosis, assessment, and accelerated healing. *Nano Energy, 118*, 108989. doi:10.1016/j.nanoen.2023.108989

Bandodkar, A. J., & Wang, J. (2014). Non-invasive wearable electrochemical sensors: A review. *Trends in Biotechnology, 32*, 363–371. doi:10.1016/j.tibtech.2014.04.005

Bhide, A., Ganguly, A., Parupudi, T., Ramasamy, M., Muthukumar, S., & Prasad, S. (2021). Next-generation continuous metabolite sensing toward emerging sensor needs. *ACS Omega, 6*, 6031–6040.

Bodas, K., & Shinde, V. (2021). Healing of wounds: A detailed review on models, biomarkers, biochemical and other wound assessment parameters. *International Journal of All Research Education and Scientific Methods, 9*. Erişim adresi: https://www.ijaresm.com/healing-of-wounds-a-detailed-review-on-models-biomarkers-biochemical-and-other-wound-assessment-parameters

Brothers, M. C., DeBrosse, M., Grigsby, C. C., Naik, R. R., Hussain, S. M., Heikenfeld, J., & Kim, S. S. (2019). Achievements and challenges for real-

time sensing of analytes in sweat within wearable platforms. *Accounts of Chemical Research, 52*, 297–306. doi:10.1021/acs.accounts.8b00555

Burgess, J. L., Wyant, W. A., Abdo Abujamra, B., Kirsner, R. S., & Jozic, I. (2021). Diabetic wound-healing science. *Medicina, 57*, 1072.

Chanmugam, A., Langemo, D., Thomason, K., Haan, J., Altenburger, E. A., Tippett, A., . . . Zortman, T. A. (2017). Relative temperature maximum in wound infection and inflammation as compared with a control subject using long-wave infrared thermography. *Advances in Skin & Wound Care, 30*, 406–414.

Chen, J., Qin, S., Liu, S., Zhong, K., Jing, Y., Wu, X., . . . Peng, C. (2023). Targeting matrix metalloproteases in diabetic wound healing. *Frontiers in Immunology, 14*. doi:10.3389/fimmu.2023.1089001

Chen, S., Qiao, Z., Niu, Y., Yeo, J. C., Liu, Y., Qi, J., . . . Lim, C. T. (2023). Wearable flexible microfluidic sensing technologies. *Nature Reviews Bioengineering, 1*, 950–971.

Chen, Z., Dong, Y., Fu, J., Bai, Y., Gao, Q., Qin, Z., . . . Li, S. (2024). Collaborative biofluid analysis based multi-channel integrated wearable detection system for the monitoring of wound infection. *Biosensors and Bioelectronics: X, 17*, 100443. doi:10.1016/j.biosx.2024.100443

Chenani, H., Saeidi, M., Rastkhiz, M. A., Bolghanabadi, N., Aghaii, A. H., Orouji, M., . . . Simchi, A. (2024). Challenges and advances of hydrogel-based wearable electrochemical biosensors for real-time monitoring of biofluids: From lab to market. A review. *Analytical Chemistry, 96*, 8160–8183. doi:10.1021/acs.analchem.3c03942

Chinnappan, R., Ramachandran, L., Uttam, I., Citartan, M., Ballal, N. V., & Mani, N. K. (2025). From biomarkers to biosensors: Modern approaches for the detection of matrix metalloproteinases (MMPs). *Biosensors, 15*, 603. doi:10.3390/bios15090603

Clemente, F., Antonacci, A., Giardi, M. T., Frisulli, V., Tambaro, F. P., & Scognamiglio, V. (2023). Last trends in point-of-care (POC) diagnostics for the management of hematological indices in home care patients. *Biosensors, 13*, 345.

Czopinska, J., Zaras, I., & Jarczewska, M. (2026). Wearable (bio)sensors for wound healing monitoring: Recent achievements, challenges, and future directions. *Bioelectrochemistry, 169*, 109204. doi:10.1016/j.bioelechem.2025.109204

Del Chicca, S., Rollo, G., Sorrentino, A., Gruppioni, E., Tarabini, M., & Saccomandi, P. (2025). Wearable and thermal drift-compensated monitoring system based on fiber Bragg grating sensors for a 3D-printed foot prosthesis. *Sensors, 25*, 885. doi:10.3390/s25030885

Deng, X., Gould, M., & Ali, M. A. (2022). A review of current advancements for wound healing: Biomaterial applications and medical devices. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials, 110*, 2542–2573.

Diacci, C., Burtscher, B., Berto, M., Ruoko, T.-P., Lienemann, S., Greco, P., . . . Biscarini, F. (2024). Organic electrochemical transistor aptasensor for interleukin-6 detection. *ACS Applied Materials & Interfaces, 16*, 61467–61474. doi:10.1021/acsami.3c12397

Dong, R., & Guo, B. (2021). Smart wound dressings for wound healing. *Nano Today, 41*, 101290.

Eriksson, E., Liu, P. Y., Schultz, G. S., Martins-Green, M. M., Tanaka, R., Weir, D., . . . Wolcott, R. (2022). Chronic wounds: Treatment consensus. *Wound Repair and Regeneration, 30*, 156–171.

Fernandez, M. L., Upton, Z., Edwards, H., Finlayson, K., & Shooter, G. K. (2012). Elevated uric acid correlates with wound severity. *International Wound Journal, 9*, 139–149.

Flynn, K., Mahmoud, N. N., Sharifi, S., Gould, L. J., & Mahmoudi, M. (2023). Chronic wound healing models. *ACS Pharmacology & Translational Science, 6*, 783–801. doi:10.1021/acsptsci.3c00030

Fritea, L., Banica, F., Costea, T. O., Moldovan, L., Dobjanschi, L., Muresan, M., & Cavalu, S. (2021). Metal nanoparticles and carbon-based nanomaterials for improved performances of electrochemical (bio)sensors with biomedical applications. *Materials, 14*, 6319.

Gao, Z., Zhou, Y., Zhang, J., Foroughi, J., Peng, S., Baughman, R. H., . . . Wang, C. H. (2024). Advanced energy harvesters and energy storage for powering wearable and implantable medical devices. *Advanced Materials, 36*, 2404492.

Grey, J. E., Enoch, S., & Harding, K. G. (2006). Wound assessment. *BMJ, 332*, 285–288. doi:10.1136/bmj.332.7536.285

Gu, H., Sun, X., Bao, H., Feng, X., & Chen, Y. (2025). Optically pH-sensing in smart wound dressings towards real-time monitoring of wound states: A review. *Analytica Chimica Acta, 1350*, 343808. doi:10.1016/j.aca.2025.343808

Guan, M., Huang, Z., Bao, Z., Ou, Y., Zou, S., & Liu, G. (2025). Gold nanoparticles incorporated liquid metal for wearable sensors and wound healing. *Chemical Engineering Journal, 508*, 161120. doi:10.1016/j.cej.2025.161120

Guo, S., & DiPietro, L. A. (2010). Factors affecting wound healing. *Journal of Dental Research, 89*, 219–229. doi:10.1177/0022034509359125

Gupta, M. N., Kudtarkar, P., Pawar, A., & Ambre, P. (2025). Importance of marker molecules in designing sensors and theranostic devices for chronic wound

care. *Molecular Pharmaceutics, 22*, 4435–4453. doi:10.1021/acs.molpharmaceut.5c00282

Haller, H. L., Sander, F., Popp, D., Rapp, M., Hartmann, B., Demircan, M., . . . Kamolz, L. P. (2021). Oxygen, pH, lactate, and metabolism—How old knowledge and new insights might be combined for new wound treatment. *Medicina, 57*, 1190.

Hasatsri, S., & Aramwit, P. (2017). Nontraditional methods to evaluate wound healing. *Dermatologic Surgery, 43*, 342–350. doi:10.1097/DSS.0000000000000957

Hossain, M. I., Zahid, M. S., Chowdhury, M. A., Hossain, M. M. M., Hossain, N., Islam, M. A., & Mobarak, M. H. (2024). Smart bandage: A device for wound monitoring and targeted treatment. *Results in Chemistry, 7*, 101292. doi:10.1016/j.rechem.2023.101292

Hosseinzadeh Fakhr, M., Lopez Carrasco, I., Belyaev, D., Kang, J., Shin, Y., Yeo, J.-S., . . . Beshchasna, N. (2024). Recent advances in wearable electrochemical biosensors towards technological and material aspects. *Biosensors and Bioelectronics: X, 19*, 100503. doi:10.1016/j.biosx.2024.100503

Huang, S.-W., Wu, Y.-F., Ahmed, T., Pan, S.-C., & Cheng, C.-M. (2024). Point-of-care detection devices for wound care and monitoring. *Trends in Biotechnology, 42*, 74–90.

Iglesias-Mayor, A., Amor-Gutiérrez, O., Toyos-Rodríguez, C., Bassegoda, A., Tzanov, T., & de la Escosura-Muñiz, A. (2022). Electrical monitoring of infection biomarkers in chronic wounds using nanochannels. *Biosensors and Bioelectronics, 209*, 114243. doi:10.1016/j.bios.2022.114243

Janghorban, M., Aradanas, I., Kazemi, S., Ngaju, P., & Pandey, R. (2022). Recent advances, opportunities, and challenges in developing nucleic acid integrated wearable biosensors for expanding the capabilities of wearable technologies in health monitoring. *Biosensors, 12*, 986. doi:10.3390/bios12110986

Jankowska, D., Bannwarth, M., Schulenburg, C., Faccio, G., Maniura-Weber, K., Rossi, R., . . . Boesel, L. (2017). Simultaneous detection of pH value and glucose concentrations for wound monitoring applications. *Biosensors and Bioelectronics, 87*, 312–319.

Jayathilaka, W. A. D. M., Qi, K., Qin, Y., Chinnappan, A., Serrano-García, W., Baskar, C., . . . Ramakrishna, S. (2019). Significance of nanomaterials in wearables: A review on wearable actuators and sensors. *Advanced Materials, 31*, 1805921. doi:10.1002/adma.201805921

Kim, J., Campbell, A. S., de Ávila, B. E.-F., & Wang, J. (2019). Wearable biosensors for healthcare monitoring. *Nature Biotechnology, 37*, 389–406. doi:10.1038/s41587-019-0045-y

Koklu, A., Ohayon, D., Wustoni, S., Druet, V., Saleh, A., & Inal, S. (2022). Organic bioelectronic devices for metabolite sensing. *Chemical Reviews, 122*, 4581–4635.

Kong, L., Li, W., Zhang, T., Ma, H., Cao, Y., Wang, K., . . . Wang, X. (2024). Wireless technologies in flexible and wearable sensing: From materials design, system integration to applications. *Advanced Materials, 36*, 2400333.

Krishnan, S. (2022). Colorimetric visual sensors for point-of-needs testing. *Sensors and Actuators Reports, 4*, 100078.

La Mattina, A. A., Mariani, S., & Barillaro, G. (2020). Bioresorbable materials on the rise: From electronic components and physical sensors to in vivo monitoring systems. *Advanced Science, 7*, 1902872.

Li, S., Lu, D., Li, S., Liu, J., Xu, Y., Yan, Y., . . . Rogers, J. A. (2024). Bioresorbable, wireless, passive sensors for continuous pH measurements and early detection of gastric leakage. *Science Advances, 10*, eadj0268. doi:10.1126/sciadv.adj0268

Li, S., Zhang, H., Zhu, M., Kuang, Z., Li, X., Xu, F., . . . Li, H. (2023). Electrochemical biosensors for whole blood analysis: Recent progress, challenges, and future perspectives. *Chemical Reviews, 123*, 7953–8039.

Li, Z., Askim, J. R., & Suslick, K. S. (2019). The optoelectronic nose: Colorimetric and fluorometric sensor arrays. *Chemical Reviews, 119*, 231–292.

Lin, W., Chen, H., Chen, X., & Guo, C. (2024). The roles of neutrophil-derived myeloperoxidase (MPO) in diseases: The new progress. *Antioxidants, 13*, 132. doi:10.3390/antiox13010132

Lindley, L. E., Stojadinovic, O., Pastar, I., & Tomic-Canic, M. (2016). Biology and biomarkers for wound healing. *Plastic and Reconstructive Surgery, 138*, 18S–28S.

Liu, Y., Luo, X., Li, L., Chen, L., Qiao, Z., Si, C., . . . Liu, X. (2025). Wearable, battery-free, and wireless microneedle-based bioelectronics for robustly-integrated chronic wound management and therapeutic diagnosis. *Nano Energy, 138*, 110909. doi:10.1016/j.nanoen.2025.110909

Lou, Z., Li, L., Wang, L., & Shen, G. (2017). Recent progress of self-powered sensing systems for wearable electronics. *Small, 13*, 1701791. doi:10.1002/smll.201701791

Luo, X., Chen, K., Deng, Z., Luo, W., Wei, S., Zheng, J., . . . Ouyang, G. (2025). Enhancing wearable strain sensor performance through a simple Poisson's ratio structural design. *Chemical Engineering Journal, 518*, 164802. doi:10.1016/j.cej.2025.164802

Lv, M., Li, Y., Qiao, X., Zeng, X., & Luo, X. (2024). An antifouling electrochemical biosensor based on oxidized bacterial cellulose and quaternized chitosan for

reliable detection of involucrin in wound exudate. *Analytica Chimica Acta, 1316*, 342821. doi:10.1016/j.aca.2024.342821

Macovei, D.-G., Irimes, M.-B., Hosu, O., Cristea, C., & Tertis, M. (2023). Point-of-care electrochemical testing of biomarkers involved in inflammatory and inflammatory-associated medical conditions. *Analytical and Bioanalytical Chemistry, 415*, 1033–1063.

Mahato, K., Saha, T., Ding, S., Sandhu, S. S., Chang, A.-Y., & Wang, J. (2024). Hybrid multimodal wearable sensors for comprehensive health monitoring. *Nature Electronics, 7*, 735–750.

Mahato, K., & Wang, J. (2021). Electrochemical sensors: From the bench to the skin. *Sensors and Actuators B: Chemical, 344*, 130178. doi:10.1016/j.snb.2021.130178

Mahmoud, N. N., Hamad, K., Al Shibitini, A., Juma, S., Sharifi, S., Gould, L., & Mahmoudi, M. (2024). Investigating inflammatory markers in wound healing: Understanding implications and identifying artifacts. *ACS Pharmacology & Translational Science, 7*, 18–27. doi:10.1021/acsptsci.3c00336

Min, J., Sempionatto, J. R., Teymourian, H., Wang, J., & Gao, W. (2021). Wearable electrochemical biosensors in North America. *Biosensors and Bioelectronics, 172*, 112750. doi:10.1016/j.bios.2020.112750

Moloudian, G., Hosseinifard, M., Kumar, S., Simorangkir, R. B. V. B., Buckley, J. L., Song, C., . . . O'Flynn, B. (2024). RF energy harvesting techniques for battery-less wireless sensing, Industry 4.0, and Internet of Things: A review. *IEEE Sensors Journal, 24*, 5732–5745.

Mota, F. A., Passos, M. L., Santos, J. L., & Saraiva, M. L. M. (2024). Comparative analysis of electrochemical and optical sensors for detection of chronic wounds biomarkers: A review. *Biosensors and Bioelectronics, 251*, 116095.

Murphy, M. P., Bayir, H., Belousov, V., Chang, C. J., Davies, K. J., Davies, M. J., . . . Janssen-Heininger, Y. (2022). Guidelines for measuring reactive oxygen species and oxidative damage in cells and in vivo. *Nature Metabolism, 4*, 651–662.

Nan, X., Wang, X., Kang, T., Zhang, J., Dong, L., Dong, J., . . . Wei, D. (2022). Review of flexible wearable sensor devices for biomedical application. *Micromachines, 13*, 1395. doi:10.3390/mi13091395

Naresh, V., & Lee, N. (2021). A review on biosensors and recent development of nanostructured materials-enabled biosensors. *Sensors, 21*, 1109. doi:10.3390/s21041109

Nasiri, S., & Khosravani, M. R. (2020). Progress and challenges in fabrication of wearable sensors for health monitoring. *Sensors and Actuators A: Physical, 312*, 112105. doi:10.1016/j.sna.2020.112105

Noushin, T., Hossain, N. I., & Tabassum, S. (2022). IoT-enabled integrated smart wound sensor for multiplexed monitoring of inflammatory biomarkers at the wound site. *Frontiers in Nanotechnology, 4*, 851041. doi:10.3389/fnano.2022.851041

Nuutila, K., & Eriksson, E. (2020). Moist wound healing with commonly available dressings. *Advances in Wound Care, 10*, 685–698.

Pang, Q., Yang, F., Jiang, Z., Wu, K., Hou, R., & Zhu, Y. (2023). Smart wound dressing for advanced wound management: Real-time monitoring and on-demand treatment. *Materials & Design, 229*, 111917. doi:10.1016/j.matdes.2023.111917

Park, J. H., Yoo, K.-C., Lee, S. B., Park, M., Kim, H. B., Kang, M., . . . Jang, H. (2025). AZD 9668, a neutrophil elastase inhibitor, promotes wound healing in the irradiated skin by inhibiting NET-derived vascular dysfunction. *International Immunopharmacology, 159*, 114860. doi:10.1016/j.intimp.2025.114860

Patel, S., Ershad, F., Zhao, M., Isseroff, R. R., Duan, B., Zhou, Y., . . . Yu, C. (2022). Wearable electronics for skin wound monitoring and healing. *Soft Science, 2*, 9. doi:10.20517/ss.2022.13

Patel, S., Maheshwari, A., & Chandra, A. (2016). Biomarkers for wound healing and their evaluation. *Journal of Wound Care, 25*, 46–55. doi:10.12968/jowc.2016.25.1.46

Peña, O. A., & Martin, P. (2024). Cellular and molecular mechanisms of skin wound healing. *Nature Reviews Molecular Cell Biology, 25*, 599–616.

Percival, S. L., McCarty, S., Hunt, J. A., & Woods, E. J. (2014). The effects of pH on wound healing, biofilms, and antimicrobial efficacy. *Wound Repair and Regeneration, 22*, 174–186.

Potekaev, N. N., Borzykh, O. B., Medvedev, G. V., Pushkin, D. V., Petrova, M. M., Petrov, A. V., . . . Shnayder, N. A. (2021). The role of extracellular matrix in skin wound healing. *Journal of Clinical Medicine, 10*, 5947. doi:10.3390/jcm10245947

Proksch, E. (2018). pH in nature, humans and skin. *The Journal of Dermatology, 45*, 1044–1052.

Pusta, A., Tertiș, M., Cristea, C., & Mirel, S. (2022). Wearable sensors for the detection of biomarkers for wound infection. *Biosensors, 12*, 1. doi:10.3390/bios12010001

Reza, M. S., Sharifuzzaman, M., Islam, Z., Assaduzaman, M., Lee, Y., Kim, D., . . . Park, J. Y. (2024). A flexible and multimodal biosensing patch integrated with microfluidics for chronic wound monitoring. *Chemical Engineering Journal, 501*, 157673. doi:10.1016/j.cej.2024.157673

Rodrigues, M., Kosaric, N., Bonham, C. A., & Gurtner, G. C. (2019). Wound healing: A cellular perspective. *Physiological Reviews, 99*, 665–706.

Salvo, P., Dini, V., Kirchhain, A., Janowska, A., Oranges, T., Chiricozzi, A., . . . Romanelli, M. (2017). Sensors and biosensors for C-reactive protein, temperature and pH, and their applications for monitoring wound healing: A review. *Sensors, 17*, 2952.

Schmidt, A. D. (2022). *Understanding the role of involucrin in skin inflammation* (Doktora tezi). Erişim adresi: ProQuest Dissertations and Theses veritabanı. (Belge No. 2659282394)

Sen, C. K. (2009). Wound healing essentials: Let there be oxygen. *Wound Repair and Regeneration, 17*, 1–18. doi:10.1111/j.1524-475X.2008.00436.x

Shen, J., Li, Z., Yu, J., & Ding, B. (2017). Humidity-resisting triboelectric nanogenerator for high performance biomechanical energy harvesting. *Nano Energy, 40*, 282–288.

Shi, Z., Dai, C., Deng, P., Li, X., Wu, Y., Lv, J., . . . Liu, Q. (2023). Wearable battery-free smart bandage with peptide functionalized biosensors based on MXene for bacterial wound infection detection. *Sensors and Actuators B: Chemical, 383*, 133598. doi:10.1016/j.snb.2023.133598

Simoska, O., Duay, J., & Stevenson, K. J. (2020). Electrochemical detection of multianalyte biomarkers in wound healing efficacy. *ACS Sensors, 5*, 3547–3557.

Spielman, A. F., Griffin, M. F., Parker, J., Cotterell, A. C., Wan, D. C., & Longaker, M. T. (2023). Beyond the scar: A basic science review of wound remodeling. *Advances in Wound Care, 12*, 57–67.

Summer, M., Ali, S., Fiaz, U., Hussain, T., Khan, R. R. M., & Fiaz, H. (2024). Revealing the molecular mechanisms in wound healing and the effects of different physiological factors including diabetes, age, and stress. *Journal of Molecular Histology, 55*, 637–654. doi:10.1007/s10735-024-10223-3

Suresh, R. R., Lakshmanakumar, M., Arockia Jayalatha, J. B. B., Rajan, K. S., Sethuraman, S., Krishnan, U. M., & Rayappan, J. B. B. (2021). Fabrication of screen-printed electrodes: Opportunities and challenges. *Journal of Materials Science, 56*, 8951–9006. doi:10.1007/s10853-020-05499-1

Swanson, T., Ousey, K., Haesler, E., Bjarnsholt, T., Carville, K., Idensohn, P., . . . Weir, D. (2022). IWII wound infection in clinical practice consensus

document: 2022 update. *Journal of Wound Care, 31*(Sup12), S10–S21. doi:10.12968/jowc.2022.31.Sup12.S10

Tan, M., Xu, Y., Gao, Z., Yuan, T., Liu, Q., Yang, R., . . . Peng, L. (2022). Recent advances in intelligent wearable medical devices integrating biosensing and drug delivery. *Advanced Materials, 34*, 2108491. doi:10.1002/adma.202108491

Tan, P., Lim, J., & Moiemen, N. (2021). Imaging techniques used for wound healing assessment: A systematic review part 1 chronic wounds. *European Burn Journal, 2*, 194–214. doi:10.3390/ebj2040015

Tang, N., Zheng, Y., Jiang, X., Zhou, C., Jin, H., Jin, K., . . . Haick, H. (2021). Wearable sensors and systems for wound healing-related pH and temperature detection. *Micromachines, 12*, 430. doi:10.3390/mi12040430

Tegl, G., Schiffer, D., Sigl, E., Heinzle, A., & Guebitz, G. M. (2015). Biomarkers for infection: Enzymes, microbes, and metabolites. *Applied Microbiology and Biotechnology, 99*, 4595–4614.

Thévenot, D. R., Toth, K., Durst, R. A., & Wilson, G. S. (2001). Electrochemical biosensors: Recommended definitions and classification. *Biosensors and Bioelectronics, 16*, 121–131. doi:10.1016/S0956-5663(01)00115-4

Thirabowonkitphithan, P., Maksuk, K., Permpoka, K., Jiraseree-amornkun, A., Wattanapanitch, W., Nilaratanakul, V., . . . Laiwattanapaisal, W. (2024). A flexible non-enzymatic hydrogel-assisted electrochemical sensor: Wireless, sensitive, and selective uric acid detection for home monitoring. *Microchemical Journal, 205*, 111268. doi:10.1016/j.microc.2024.111268

Thirabowonkitphithan, P., Phuengmaung, P., Leelahavanichkul, A., & Laiwattanapaisal, W. (2023). MWCNTs/PVA hydrogel-modified electrochemical sensors for ex vivo and in vivo detection of pyocyanin biomarker for *Pseudomonas aeruginosa* wound infection. *ACS Applied Electronic Materials, 5*, 821–831.

Uberoi, A., McCready-Vangi, A., & Grice, E. A. (2024). The wound microbiota: Microbial mechanisms of impaired wound healing and infection. *Nature Reviews Microbiology, 22*, 507–521.

Vo, D.-K., & Trinh, K. T. L. (2024). Advances in wearable biosensors for healthcare: Current trends, applications, and future perspectives. *Biosensors, 14*, 560.

Vo, D.-K., & Trinh, K. T. L. (2025). Advances in wearable biosensors for wound healing and infection monitoring. *Biosensors, 15*, 139. doi:10.3390/bios15030139

Wang, C., Shirzaei Sani, E., & Gao, W. (2022). Wearable bioelectronics for chronic wound management. *Advanced Functional Materials, 32*, 2111022. doi:10.1002/adfm.202111022

Wang, C., Shirzaei Sani, E., Shih, C.-D., Lim, C. T., Wang, J., Armstrong, D. G., & Gao, W. (2024). Wound management materials and technologies from bench to bedside and beyond. *Nature Reviews Materials, 9*, 550–566.

Wang, H., & Yang, L. (2023). Applications of injectable hemostatic materials in wound healing: Principles, strategies, performance requirements, and future perspectives. *Theranostics, 13*, 4615–4635.

Wang, J., Zhang, H., Hu, H., Hu, S., & Ma, L. (2024). An enzyme-responsive hydrogel of ferrocene-grafted carboxymethyl chitosan as a soft electrochemical sensor for MMP-9 detection. *International Journal of Biological Macromolecules, 268*, 131582. doi:10.1016/j.ijbiomac.2024.131582

Wang, X., Huo, H., Xu, C., Lin, H., Wang, Q., Yang, J., . . . Zhang, P. (2023). A sensitive non-enzymatic dual-conductive biosensor for continuous glucose monitoring. *Analytica Chimica Acta, 1279*, 341845. doi:10.1016/j.aca.2023.341845

Wilkinson, H. N., & Hardman, M. J. (2020). Wound healing: Cellular mechanisms and pathological outcomes. *Open Biology, 10*, 200223.

Wu, Y., Wu, L., & Yu, M. (2024). The clinical value of intelligent wound measurement devices in patients with chronic wounds: A scoping review. *International Wound Journal, 21*, e14843. doi:10.1111/iwj.14843

Xiao, L., Ni, W., Zhao, X., Guo, Y., Li, X., Wang, F., . . . Xu, X. (2021). A moisture balanced antibacterial dressing loaded with lysozyme possesses antibacterial activity and promotes wound healing. *Soft Matter, 17*, 3162–3173. doi:10.1039/D0SM02245D

Xu, M., Obodo, D., & Yadavalli, V. K. (2019). The design, fabrication, and applications of flexible biosensing devices. *Biosensors and Bioelectronics, 124–125*, 96–114.

Yan, J., Wang, J., Wu, Z., Li, Z., Li, Z., & Hu, Z. (2025). Bioelectronic sutures with electrochemical glucose-sensing for real-time wound monitoring. *Analytica Chimica Acta, 1370*, 344320. doi:10.1016/j.aca.2025.344320

Yazarlu, O., Iranshahi, M., Kashani, H. R. K., Reshadat, S., Habtemariam, S., Iranshahy, M., & Hasanpour, M. (2021). Perspective on the application of medicinal plants and natural products in wound healing: A mechanistic review. *Pharmacological Research, 174*, 105841. doi:10.1016/j.phrs.2021.105841

Yin, S., Yu, Z., Song, N., Guo, Z., Li, W., Ma, J., . . . Liang, M. (2024). A long lifetime and highly sensitive wearable microneedle sensor for the continuous real-time monitoring of glucose in interstitial fluid. *Biosensors and Bioelectronics, 244*, 115822.

Zeng, Q., Qi, X., Shi, G., Zhang, M., & Haick, H. (2022). Wound dressing: From nanomaterials to diagnostic dressings and healing evaluations. *ACS Nano, 16*, 1708–1733.

Zeng, X., Peng, R., Fan, Z., & Lin, Y. (2022). Self-powered and wearable biosensors for healthcare. *Materials Today Energy, 23*, 100900.

Zhang, J., Wen, M., Wang, D., Wang, B., Jiang, S., Liu, X., . . . Kai, T. (2025). A wearable and wireless electrochemical device based on Cu-BTC MOF for pyocyanin detection and wound healing. *Biosensors and Bioelectronics, 289*, 117869. doi:10.1016/j.bios.2025.117869

Zhang, X., Wang, Y., He, X., Yang, Y., Chen, X., & Li, J. (2024). Advances in microneedle technology for biomedical detection. *Biomaterials Science, 12*, 5134–5149.

Zhang, Y., Lin, B., Huang, R., Lin, Z., Li, Y., Li, J., & Li, X. (2021). Flexible integrated sensing platform for monitoring wound temperature and predicting infection. *Microbial Biotechnology, 14*, 1566–1579.

Zhao, R., Liang, H., Clarke, E., Jackson, C., & Xue, M. (2016). Inflammation in chronic wounds. *International Journal of Molecular Sciences, 17*, 2085.

Zheng, X. T., Yang, Z., Sutarlie, L., Thangaveloo, M., Yu, Y., Salleh, N. A. B. M., . . . Loh, X. J. (2023). Battery-free and AI-enabled multiplexed sensor patches for wound monitoring. *Science Advances, 9*, eadg6670.

Zheng, Z., Zhu, R., Peng, I., Xu, Z., & Jiang, Y. (2024). Wearable and implantable biosensors: Mechanisms and applications for closed-loop therapeutic systems. *Journal of Materials Chemistry B, 12*, 8577–8604.

BÖLÜM 8

P4 Programlama Dili: Temel Kavramlar, Mimari, Derleme ve Uygulama

***Mert Öpöz*[1]**
***Tuna Göksu*[2]**

[1] Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0009-0002-8409-099X
[2] Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-9028-6422

1. Giriş ve Temel Kavramlar

Modern ağ altyapılarında performans, güvenlik, gözlemlenebilirlik ve yeni protokollere uyum gereksinimleri giderek artmaktadır. Geleneksel ağ cihazlarında paket işleme işlevlerinin önemli bir bölümü üretici tarafından önceden tanımlanmış donanım ve yazılım bileşenleriyle gerçekleştirilir. Bu yaklaşım yüksek performans sağlayabilmekle birlikte, veri düzlemindeki paket işleme davranışının değiştirilmesi gerektiğinde donanımın ve üreticiye özgü yazılım yığınının sınırlarıyla karşılaşılmasına neden olabilir.

Yazılım tanımlı ağlar (Software-Defined Networking, SDN), kontrol düzlemi ile veri düzleminin ayrıştırılması ve ağ davranışının yazılım aracılığıyla yönetilmesi fikrini öne çıkarmıştır. P4 (Programming Protocol-independent Packet Processors) ise bu kavramlardan farklı bir katmanda konumlanır: P4, esas olarak veri düzleminde paketlerin nasıl ayrıştırılacağını, hangi alanların işleneceğini, hangi eşleşmelerin yapılacağını ve hangi eylemlerin uygulanacağını tanımlamak için kullanılan etki alanına özgü bir programlama dilidir [1,2].

P4'ün temel amacı, veri düzleminin davranışını programlanabilir hâle getirerek belirli bir protokol ailesine veya önceden tanımlanmış paket işleme mantığına bağımlılığı azaltmaktır. İlk P4 çalışmasında üç temel tasarım hedefi vurgulanmıştır: sahada yeniden yapılandırılabilirlik, protokol bağımsızlığı ve hedef bağımsızlığı [1]. Bu hedefler, P4'ün günümüzdeki kullanımını anlamak açısından önemlidir.

Burada 'hedef bağımsızlığı' ifadesi, aynı P4 kaynağının bütün hedeflerde hiçbir değişiklik yapılmadan çalışacağı anlamına gelmez. P4 dilinin sözdizimi ve semantiği ile hedef mimarinin sunduğu yetenekler farklı kavramlardır. Gerçek bir programın taşınabilirliği; seçilen mimariye, extern nesnelerine, metadata'ya, tablo ve bellek kaynaklarına, pipeline kısıtlarına ve hedefe özgü özelliklere bağlıdır [2,3].

1.1. P4 Nedir?

P4 (Programming Protocol-independent Packet Processors), ağ veri düzlemlerinin programlanması için geliştirilmiş, etki alanına özgü bir programlama dilidir. P4_16, dilin güncel ana sürüm ailesidir. P4_16 dil spesifikasyonu, dilin sözdizimini ve semantiğini tanımlar; bir P4 programının belirli bir cihaz üzerinde nasıl derleneceğini, yükleneceğini veya çalıştırılacağını tek başına tanımlamaz [2].

Bu ayrım önemlidir. P4 programı, bir hedef mimarinin programlanabilir bloklarını kullanarak paket işleme davranışını tanımlar. Derleyici ve hedefe özgü toolchain (yazılım araçları kümesi) ise bu tanımı belirli bir ASIC, FPGA, SmartNIC, yazılım anahtarı veya başka bir veri düzlemi hedefinin kaynak ve kısıtlarına eşler.

P4 açık standartlar ekosistemi içinde geliştirilmektedir. P4.org tarafından P4_16 dil spesifikasyonunun yanı sıra Portable Switch Architecture (PSA), Portable NIC Architecture (PNA), P4Runtime ve In-band Network Telemetry (INT) gibi ilişkili spesifikasyonlar yayımlanmaktadır [3].

1.2. P4 ile SDN Arasındaki İlişki

SDN bir ağ mimarisi yaklaşımıdır; P4 ise veri düzlemi programlama dilidir. Bu nedenle ikisini birbirinin alternatifi olarak değerlendirmek doğru değildir. Bir SDN sisteminde merkezi veya dağıtık bir kontrol düzlemi bulunabilir ve bu kontrol düzlemi çeşitli mekanizmalarla veri düzlemini yönetebilir. P4, veri düzleminin paket işleme davranışının programlanmasında kullanılabilir.

P4 ile programlanan bir cihazın çalışma zamanı tablolarının bir kontrol uygulaması tarafından yönetilmesi için P4Runtime gibi bir API kullanılabilir. Böylece P4 kaynak kodu ile tanımlanan veri düzlemi davranışı, P4Runtime üzerinden kontrol düzleminin çalışma zamanı girdileriyle birlikte işletilebilir [4].

1.3. P4 ile VNF/NFV Arasındaki İlişki

Sanallaştırılmış ağ fonksiyonları (Virtualized Network Functions, VNF) veya genel olarak ağ fonksiyonlarının sanallaştırılması (NFV) kavramı, ağ fonksiyonlarının sanal makineler veya yazılım bileşenleri üzerinde çalıştırılmasıyla ilgilidir. P4 ise paket işleme veri düzleminin programlanmasına odaklanır dolayısıyla doğrudan VNF/NFV'nin karşılığı değildir. Bununla birlikte P4, belirli ağ fonksiyonlarının paket işleme kısmının programlanabilir veri düzlemine taşınmasında veya ağ fonksiyonlarının donanım üzerinde hızlandırılmasında kullanılabilir.

1.4. P4 ile OpenFlow'un Karşılaştırılması

P4 ve OpenFlow, yazılım tanımlı ağlar (Software-Defined Networking, SDN) bağlamında birlikte anılabilen, ancak farklı katmanlarda ve farklı amaçlarla kullanılan iki teknolojidir. OpenFlow temel olarak kontrol düzlemi ile veri düzlemi arasındaki iletişimi ve veri düzlemindeki iletim kurallarının yönetimini tanımlayan bir protokol yaklaşımıdır. P4 ise veri düzlemindeki paket işleme davranışının programlanmasını sağlayan bir programlama dilidir [1,13]. Bu nedenle P4 ve OpenFlow doğrudan birbirinin alternatifi olarak değerlendirilmemelidir.

OpenFlow yaklaşımında anahtarlama cihazının veri düzleminde bulunan akış tabloları, kontrol düzlemindeki bir denetleyici tarafından OpenFlow mesajları aracılığıyla yapılandırılabilir. Denetleyici; belirli başlık alanlarına, port bilgilerine veya diğer eşleşme kriterlerine göre hangi paketlerin hangi işlemlere tabi tutulacağını belirleyen akış kurallarını cihaza gönderebilir. Böylece ağın kontrol mantığı merkezi veya mantıksal olarak merkezi bir kontrol düzleminden yönetilebilir. Bununla birlikte OpenFlow'un klasik tasarımında desteklenen

eşleşme alanları ve işlemler protokol tarafından önceden tanımlanmış bir model etrafında şekillenir. Bu durum, standartta doğrudan modellenmeyen yeni protokollerin veya özel paket işleme davranışlarının desteklenmesini zorlaştırabilir [1,13].

P4 yaklaşımında ise öncelikle veri düzleminin kendisinin nasıl çalışacağı programlanır. Programcı; paket başlıklarını, parser durumlarını, metadata yapılarını, match-action tablolarını, action'ları ve deparser davranışını tanımlayabilir. Böylece yalnızca tablo girdileri değil, paketlerin nasıl ayrıştırılacağı ve hangi veri düzlemi işlemlerinden geçirileceği de programlanabilir [1,2]. Örneğin P4 programı özel bir paket başlığını tanımlayabilir, bu başlığın parser tarafından hangi koşullarda ayrıştırılacağını belirleyebilir ve başlık alanlarını match-action tablolarında kullanabilir.

Bu açıdan temel fark, OpenFlow'un mevcut veri düzlemi işleme modelinin çalışma zamanında kontrol edilmesine, P4'ün ise veri düzlemi işleme modelinin programlanmasına odaklanmasıdır. Bununla birlikte bu iki yaklaşım birbirini dışlamaz. P4 ile programlanmış bir veri düzleminin çalışma zamanındaki tablolarının yönetimi için P4Runtime gibi bir API kullanılabileceği gibi, farklı mimari tasarımlarda P4 ile programlanmış veri düzlemleri başka kontrol düzlemi mekanizmalarıyla da yönetilebilir [4].

1.4.1. Benzerlikler

P4 ve OpenFlow arasında önemli benzerlikler bulunmaktadır:

- Her ikisi de ağ cihazlarının veri düzlemi davranışının yazılım aracılığıyla yönetilmesini ve değiştirilmesini kolaylaştırmayı amaçlayan SDN ekosistemi içinde kullanılabilir.
- Her iki yaklaşımda da paketlerin belirli alanlarına veya metadata bilgilerine göre karar verilmesi ve buna bağlı olarak paket üzerinde bir işlem gerçekleştirilmesi mümkündür.
- Akışların sınıflandırılması, yönlendirme, ACL, yük dengeleme ve trafik politikalarının uygulanması gibi birçok ağ işlevi her iki yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilebilir.
- Kontrol düzlemi ile veri düzleminin birbirinden ayrılması her iki yaklaşımın kullanıldığı sistemlerde önemli bir tasarım özelliğidir.
- Her iki teknoloji de geleneksel, tamamen sabit veri düzlemlerine kıyasla ağ davranışının yazılım aracılığıyla daha esnek biçimde yönetilmesine katkıda bulunabilir.

Ancak bu benzerlikler, iki teknolojinin aynı işlevi gerçekleştirdiği anlamına gelmez. Özellikle P4'ün programlanabilir parser, control ve deparser yapıları,

OpenFlow'un temel akış kuralı modelinden daha geniş bir veri düzlemi programlama olanağı sunmaktadır.

1.4.2. Temel Farklar

P4 ile OpenFlow arasındaki temel farklar Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. P4 ile OpenFlow arasındaki temel farklar

Özellik	P4	OpenFlow
Temel amacı	Veri düzlemi paket işleme davranışını programlamak	Kontrol düzleminin veri düzlemindeki akış kurallarını yönetmesini sağlamak
Temel yapı	Programlama dili	Kontrol düzlemi–veri düzlemi iletişim protokolü
Parser'ın tanımlanması	P4 programı ile tanımlanabilir	Klasik OpenFlow modelinde parser davranışı programcı tarafından P4'teki gibi tanımlanmaz
Match-action	Programcı tarafından tanımlanabilir	Önceden tanımlanmış OpenFlow akış tablosu modeli üzerinden gerçekleştirilir
Yeni protokol desteği	Yeni başlık ve ayrıştırma mantığı P4 ile tanımlanabilir	Standart OpenFlow eşleşme modelinin dışında kalan protokoller için doğrudan destek daha sınırlıdır
Veri düzlemi davranışı	Programlanabilir	Büyük ölçüde cihazın ve OpenFlow switch pipeline'ının sunduğu işlevlere bağlıdır
Çalışma zamanı yönetimi	P4Runtime gibi API'lerle yapılabilir	OpenFlow mesajlarıyla yapılabilir
Taşınabilirlik	Dil + architecture + target özelliklerine bağlıdır	OpenFlow protokolünü destekleyen cihazların sunduğu özelliklere bağlıdır
Tipik kullanım	Programlanabilir anahtarlama cihazı, SmartNIC, FPGA ve araştırma veri düzlemleri	SDN kontrolü ve akış tabanlı ağ yönetimi

Tablo 1.'deki karşılaştırmadan görülebileceği üzere P4'ün temel farklılığı, yalnızca hangi kuralın uygulanacağını değil, bu kuralın uygulanabilmesi için veri düzleminin paketleri nasıl yorumlayacağını da programlayabilmesidir. Örneğin P4 ile yeni bir header yapısı tanımlanabilir ve bu header parser tarafından ayrıştırılarak bir match-action tablosunda kullanılabilir. OpenFlow'un klasik modelinde ise denetleyicinin kullanabileceği eşleşme alanları ve eylemler, protokolün ve anahtarlama cihazının desteklediği modele bağlıdır.

1.4.3. Kullanım Amaçları

OpenFlow özellikle SDN denetleyicisinin ağ cihazlarının akış tablolarını merkezi olarak yönetmesi gereken senaryolarda kullanılmıştır. Örneğin bir denetleyici, belirli bir kaynak ve hedef IP adresine sahip trafiğin belirli bir çıkış portuna gönderilmesini veya belirli bir trafiğin engellenmesini OpenFlow kuralları aracılığıyla anahtarlama cihazına bildirebilir.

P4 ise veri düzleminin paket işleme davranışının özelleştirilmesinin gerektiği durumlarda daha geniş bir programlama modeli sunar. Örneğin:

- yeni veya özel paket başlıklarının ayrıştırılması,
- özel match-action pipeline'larının oluşturulması,
- ağ telemetrisi,
- yük dengeleme,
- güvenlik ve DDoS azaltma mekanizmaları,
- paket filtreleme,
- özel kapsülleme/decapsulation işlemleri,
- in-network computing,
- SmartNIC üzerinde paket işleme,
- araştırma amaçlı yeni ağ protokollerinin prototiplenmesi

gibi uygulamalarda P4 kullanılabilir [10–15].

Bu nedenle OpenFlow ile P4 arasındaki farkı “OpenFlow eski, P4 yeni” biçiminde ifade etmek akademik açıdan yeterli değildir. Daha doğru bir yaklaşım, iki teknolojinin farklı problemleri hedeflediğini belirtmektir: OpenFlow, kontrol düzleminin veri düzlemindeki kuralları yönetmesine yönelik bir protokol; P4 ise veri düzleminin paket işleme davranışını tanımlamaya yönelik bir programlama dilidir. P4 ile programlanan bir veri düzleminin çalışma zamanında yönetilmesi için P4Runtime gibi mekanizmaların kullanılması, bu iki kavram arasındaki ayrımı daha da netleştirmektedir [4].

2. P4’ün Ortaya Çıkışı ve Tasarım Hedefleri

2.1. Geleneksel Veri Düzlemlerindeki Sınırlamalar

P4’ün ortaya çıkışındaki temel motivasyonlardan biri, paket işlemcilerinin davranışının belirli protokoller ve üreticiye özgü işlevlerle önceden sınırlandırılabilmesidir. İlk P4 makalesi, mevcut SDN kontrol protokollerinin belirli protokol başlıklarına bağlı kalmasının yeni protokollerin ve yeni paket işleme işlevlerinin eklenmesini zorlaştırabildiğini vurgulamıştır [1].

Geleneksel modelde, ağ kabiliyetlerinin sabit fonksiyonlu çiplerle (ASIC) belirlendiği durumlar mevcuttur. Bununla birlikte, 'geleneksel cihazlarda her yeni protokol için mutlaka yeni bir ASIC tasarlanması gerekir' biçimindeki ifade fazla genelleyicidir. Üreticiler yeni özellikleri yazılım, firmware, microcode, tablo yapıları veya mevcut donanımın sunduğu esneklikler üzerinden de sağlayabilir. P4'ün farkı, veri düzlemi paket işleme mantığının belirli ölçüde programlanabilir bir model üzerinden ifade edilmesine olanak vermesidir. Sabit fonksiyonlu çiplerin kullanıldığı modellerde yeni bir özellik eklemek için çiplerin baştan tasarlanması gerektiğinden süreç yıllar alabilirken, P4 ile ağ davranışı yazılım yoluyla yönetilir. Programcılar, P4 kodu ile ağın çalışma şeklini tanımlar ve bu kod hedef cihaza yüklenir. Böylelikle yeni protokoller dakikalar içinde devreye alınabilir.

2.2. Protokol Bağımsızlığı

P4, belirli bir ağ protokolünü dilin zorunlu parçası olarak tanımlamaz. Programcı Ethernet, IPv4, IPv6, TCP, VXLAN veya özel bir protokolün başlıklarını P4 programında tanımlayabilir ve parser aracılığıyla bunların hangi koşullarda ayrıştırılacağını belirleyebilir [1,2].

P4'ün IP veya Ethernet gibi yaygın protokoller için bile yerleşik bir desteği olmaması, P4'ün hiçbir protokolü desteklemediği anlamına gelmez. P4 programı tarafından protokol başlıkları ve bunların işlenme biçiminin tanımlanabilir, bu da yaygın protokollerin yanı sıra özel protokollerin oluşturulmasına olanak tanır.

2.3. Hedef Bağımsızlığı ve Taşınabilirlik

P4 tasarımında hedef bağımsızlığı önemli bir hedeftir. Ancak dil düzeyindeki taşınabilirlik ile hedef donanım düzeyindeki taşınabilirlik birbirinden ayrılmalıdır. P4 programının farklı hedeflerde çalışabilmesi için hedeflerin aynı veya uyumlu bir architecture modelini desteklemesi, kullanılan extern ve metadata'ların taşınabilir olması ve programın hedef kaynaklarına sığması gerekir [2,3].

Örneğin PSA, ağ anahtarlarının ortak yeteneklerini tanımlayan taşınabilir bir hedef mimarisidir. PNA ise NIC/SmartNIC türü cihazların ortak yeteneklerini modellemek üzere geliştirilmiştir. Bu mimariler P4 dilinin kendisi değildir; P4 programının üzerinde çalıştığı hedef mimari sözleşmesini tanımlar [3,5].

2.4. Sahada Yeniden Yapılandırılabilirlik

P4'ün önemli hedeflerinden biri, cihaz devreye alındıktan sonra veri düzlemi paket işleme davranışının yeniden yapılandırılabilmesidir. Ancak bu durum her P4 cihazında her türlü değişikliğin çalışma zamanında yapılabileceği anlamına gelmez. Örneğin bir tabloya yeni giriş eklemek ile parser yapısını veya pipeline kaynak kullanımını değiştirmek aynı işlem değildir. Birçok sistemde P4 programının kendisi derlenip hedefe yüklenirken, tablo girdileri ve bazı çalışma

zamanı nesneleri P4Runtime gibi mekanizmalar üzerinden daha sonra değiştirilebilir [4].

3. P4 Dilinin Temel Yapı Taşları

Bir P4 programının temel yapısı; paket başlıklarının ve metadata'nın tanımlanması, parser ile başlıkların çıkarılması, control bloklarında paket işleme mantığının uygulanması, match-action tablolarının kullanılması ve deparser ile çıkış paketinin oluşturulması etrafında şekillenir. Buna ek olarak counter, meter, register ve hedefe özgü extern nesneleri gibi durum bilgili veya özel işlev sağlayan bileşenler kullanılabilir (Şekil 1.) [2].



Şekil 2. P4 dilinin yapı taşları

3.1. Header ve Metadata

Header tanımları, paket üzerindeki alanların bit genişlikleriyle birlikte ifade edilmesini sağlar. Örneğin IPv4 başlığındaki kaynak adresi, hedef adresi, TTL ve protokol alanları bir P4 header türü içinde tanımlanabilir. Metadata ise paketin kendisinde bulunması gerekmeyen, veri düzlemi işleme sürecinde kullanılan bilgileri taşımak için kullanılır.

Metadata'nın içeriği mimariye göre değişebilir. Kullanıcı tanımlı metadata beraberinde hedef mimarinin intrinsic metadata'sı da bulunabilir. Bu nedenle metadata alanlarının tüm P4 hedeflerinde aynı olduğu varsayılmamalıdır.

3.2. Parser

Parser, gelen paket akışından programın ihtiyaç duyduğu başlıkları çıkaran ve bu işlem sırasında durumlar arasında geçiş yapan bir yapıdır. P4 parser'ları sonlu durum makineleri şeklinde modellenir. Tipik bir parser akışı `start` durumundan başlayıp başlıkların `extract` edilmesi, koşullu geçişler ve `accept` veya `reject` ile sonlandırılması şeklindedir [2].

Parser'ın temel görevi paket yükünün tamamını analiz etmek değildir. P4 programı yalnızca gerekli başlıkları ve alanları ayrıştıracak şekilde tasarlanabilir. Bununla birlikte P4'ün veri düzleminde belirli miktarda paket yükü veya protokol alanı üzerinde işlem yapması hedef mimarinin parser ve pipeline yeteneklerine bağlıdır.

Değişken uzunluklu alanların işlenmesi, P4'te imkânsız değildir; ancak hedefin parser kapasitesi, header stack, varbit kullanımı, ayrıştırma mantığı ve kaynak sınırları dikkate alınmalıdır. Bu tür işlemlerin her durumda recirculation gerektirdiği söylenemez.

3.3. Control ve Kontrol Akışı

Parser tarafından ayrıştırılan başlıklar ve metadata, control bloklarında işlenir. Control blokları tablo çağrılarını, koşullu ifadeleri ve eylemleri düzenler. P4, genel amaçlı bir programlama dili gibi sınırsız döngüler ve dinamik bellek tahsisi sunmaz; bunun temel nedeni veri düzlemi hedeflerinde öngörülebilir ve yüksek hızlı paket işleme modelini korumaktır [2].

Bu kısıtlar, P4'ü C/C++ gibi genel amaçlı dillerden ayırır. P4 programının hedef donanıma derlenebilmesi için kontrol akışının ve kaynak kullanımının hedef mimarinin kısıtlarına uygun olması gerekir.

3.4. Match-action Tabloları

Match-action table, P4 veri düzleminin en önemli soyutlamalarından biridir. Bir tablo genel olarak bir veya daha fazla anahtar alanı, eşleşme türü, eylem kümesi, tablo boyutu ve varsayılan eylem gibi özelliklere sahiptir. Çalışma

zamanında kontrol düzlemi tablo girdileri sağlayabilir; eşleşme gerçekleştiğinde ilgili eylem ve eylem parametreleri uygulanır [2,4].

Yaygın eşleşme türleri arasında exact, longest-prefix match (LPM), ternary ve range bulunur. Hangi eşleşme türlerinin kullanılabileceği ve bunların uygulanma ayrıntıları hedef mimariye göre değişebilir. Örneğin PSA spesifikasyonu range, ternary, LPM ve exact eşleşme türlerini tanımlar [5].

Tabloların yalnızca 'IP adresine göre yönlendirme' amacıyla kullanıldığı düşünülmemelidir. ACL, yük dengeleme, tünel sonlandırma, QoS sınıflandırması, telemetri işaretleme ve güvenlik politikaları gibi birçok işlev match-action modeliyle gerçekleştirilebilir.

3.5. Eylemler

Action, tablo eşleşmesi sonucunda gerçekleştirilecek işlemleri tanımlar. Bir eylem başlık alanlarının değiştirilmesi, metadata ayarlanması, çıkış portunun belirlenmesi, başlık ekleme/çıkarma işlemlerinin hazırlanması veya mimarinin sunduğu extern işlevlerinin çağrılması gibi işlemleri içerebilir.

Eylemlerin yapabileceği işlemler sınırsız değildir. Desteklenen işlemler P4 dilinin semantiği ile hedef mimarinin ve extern API'lerinin yetenekleri tarafından belirlenir.

3.6. Deparser

Deparser, işlenmiş paket başlıklarının çıkış paketine dönüştürülmesini sağlar. Deparser, parser'ın mekanik olarak 'tersi' değildir. Parser gelen bayt akışından header instance'larını çıkarırken, deparser programın `emit` ifadelerinde belirttiği geçerli header instance'larını belirtilen sırada serileştirir [2].

Bu nedenle bir P4 programında başlık ekleme, çıkarma veya değiştirme yapılacaksa, header'ın geçerlilik durumu ve deparser'daki emit sırası birlikte ele alınmalıdır.

3.7. Counter, Meter ve Register

Counter nesneleri paket veya olay sayımı için kullanılır. Meter nesneleri trafik veya olay oranını belirli ölçüm kurallarıyla sınıflandırmak için kullanılabilir. Meter sonucu, örneğin bir eylem tarafından renk/sınıf bilgisi üretmek veya hedef mimarinin trafik yönetimi mekanizmalarında karar vermek için kullanılabilir. Meter kavramını doğrudan 'trafik şekillendirme' ile eşitlemek doğru değildir.

Register nesneleri ise paketler arasında durum saklamak için kullanılabilir. Register'lar akış istatistikleri, sayaç benzeri durumlar veya belirli algoritmaların ara durumları için kullanılabilir. Ancak register erişimlerinin anlamı, atomiklik özellikleri ve performans etkileri hedef mimariye bağlıdır.

4. P4 Mimari Modelleri

P4 programlarının işlevsel olarak tanımlanması ve farklı ağ cihazları üzerinde çalıştırılabilmesi, dilin sunduğu programlama olanaklarının yanı sıra hedef mimarinin özellikleriyle de doğrudan ilişkilidir. P4_16 dil spesifikasyonu, paket işleme davranışının programlanmasına yönelik temel sözdizimini ve semantiğini tanımlarken, programların belirli bir donanım veya yazılım platformunda nasıl yürütüleceği ilgili hedef mimarinin sunduğu işlevler ve kısıtlamalar tarafından belirlenmektedir. Bu bağlamda mimari modeller, P4 programları ile hedef platformların veri düzlemi bileşenleri arasındaki etkileşimi düzenleyen ve programın hangi işlevsel bileşenleri kullanabileceğini tanımlayan bir yapı sunmaktadır [2].

P4 ekosisteminde geliştirilen mimari modeller, farklı ağ cihazlarının işlem yeteneklerini, paket işleme aşamalarını ve kontrol düzlemiyle etkileşim mekanizmalarını ortak bir çerçevede ifade etmeyi amaçlamaktadır. Bu modeller arasında PISA, PSA, V1Model ve PNA gibi farklı kapsam ve tasarım hedeflerine sahip yaklaşımlar bulunmaktadır. Bununla birlikte, söz konusu kavramlar aynı düzeyde değerlendirilmemelidir. PISA, programlanabilir paket işleme mimarisine ilişkin temel bir model sunarken PSA ve PNA, belirli cihaz sınıflarının işlevsel gereksinimlerini karşılamaya yönelik mimari tanımlamalar olarak öne çıkmaktadır. V1Model ise özellikle BMv2 yazılım anahtarıyla birlikte kullanılan, P4 programlarının geliştirilmesi ve test edilmesini destekleyen bir mimari modeldir.

Bu bölümde, P4 programlarının farklı hedef platformlarla ilişkisini ortaya koymak amacıyla PISA, PSA, V1Model, BMv2 ve PNA mimarileri ele alınmaktadır. Ayrıca hedefe özgü mimarilerin sunduğu olanaklar ve kısıtlamalar incelenerek mimari seçiminin P4 programlarının taşınabilirliği, uygulanabilirliği ve veri düzlemi performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmektedir. Böylece P4 dilinin programlama yetenekleri ile bu yeteneklerin farklı donanım ve yazılım ortamlarında gerçekleştirilmesini sağlayan mimari modeller arasındaki ilişkinin açıklığa kavuşturulması amaçlanmaktadır.

4.1. PISA

PISA (Protocol-Independent Switch Architecture), programlanabilir anahtarlama cihazlarının veri düzlemlerini tanımlamak ve bu cihazların çalışma prensiplerini modellemek amacıyla kullanılan genel bir mimari yaklaşımı ifade eder. PISA'nın temel amacı, paket işleme sürecinin belirli bir ağ protokolüne veya sabit bir donanım işlevine bağlı olmaksızın, programlanabilir veri düzlemi bileşenleri üzerinden gerçekleştirilebilmesini açıklamaktır. Bu yaklaşımda paketler genel olarak parser, match-action pipeline ve deparser gibi programlanabilir bileşenlerden geçirilerek işlenir.

PISA modelinde parser, gelen paketin başlıklarını ve ilgili alanlarını tanımlayarak bunları veri düzleminin sonraki işlem aşamalarında kullanılabilecek biçimde ayrıştırır. Match-action aşamalarında, paket veya metadata alanlarından elde edilen bilgiler tablolarla eşleştirilir ve eşleşme sonucuna bağlı olarak belirlenen action'lar gerçekleştirilir. Deparser ise işleme sürecinin sonunda güncellenmiş başlık ve veri alanlarını uygun sırada birleştirerek paketin çıkış biçimini oluşturur. Bu yapı, paket işleme mantığının donanımın sabit işlevlerinden ayrıştırılmasına ve programlanabilir bir veri düzlemi üzerinde ifade edilmesine olanak sağlar.

PISA, belirli bir üreticiye veya tek bir donanım gerçekleştirimine ait olmak yerine, programlanabilir switch mimarilerinin kavramsal olarak ifade edilmesini sağlayan bir model niteliğindedir. P4 dili ise bu tür programlanabilir veri düzlemlerinde paket işleme davranışının tanımlanmasında kullanılabilecek bir programlama dili olarak değerlendirilebilir. Dolayısıyla PISA, P4 dilinin kendisi veya belirli bir switch donanımı değil; programlanabilir paket işleme mimarisini açıklamak için kullanılan bir referans modeldir.

4.2. PSA

PSA (Portable Switch Architecture), P4 programlarının farklı programlanabilir anahtarlama hedeflerinde daha taşınabilir biçimde gerçekleştirilebilmesini desteklemek amacıyla tanımlanmış bir hedef mimari spesifikasyonudur. PSA, bir anahtarlama cihazının farklı arayüzlerden paketleri alması, paketleri veri düzleminde işlemesi ve uygun çıkış arayüzlerinden iletmesi sırasında kullanılan programlanabilir P4 bloklarını, paket işleme yollarını (packet paths), metadata türlerini ve counter, meter ve register gibi durum tutan veya ölçüm gerçekleştiren bileşenleri tanımlar [5].

PSA'nın temel amacı, P4_16 ile geliştirilen programların belirli bir donanım gerçekleştirimine bağımlılığını azaltarak farklı PSA uyumlu hedefler arasında taşınabilirliğini artırmaktır. Bununla birlikte, aynı PSA spesifikasyonuna uygun olan iki hedefin donanım kaynakları bakımından birbirleriyle özdeş olduğu sonucuna varılamaz. Hedefler arasında işlem aşamalarının sayısı, bellek türleri ve kapasiteleri, bit genişlikleri, tablo boyutları ve diğer donanıma özgü kaynaklar farklılık gösterebilir. Bu nedenle PSA uyumluluğu, ortak bir programlama ve mimari arayüzün sağlanması açısından taşınabilirliği desteklerken, her hedefin kaynak ve gerçekleştirme kısıtlarını ortadan kaldırmaz.

PSA ile PISA'nın aynı kavramlar olarak değerlendirilmesi doğru değildir. PSA, P4_16 için tanımlanmış belirli bir Portable Switch Architecture spesifikasyonudur ve programlanabilir switch hedeflerinin işlevsel bloklarını, paket işleme yollarını ve bu bloklarla ilişkili arayüzleri daha somut biçimde tanımlar. PISA ise programlanabilir anahtarlama veri düzlemlerini açıklamak için kullanılan daha genel bir mimari modeldir. Bu nedenle PSA, PISA'nın yerine geçen veya onunla eş anlamlı olan bir kavram olarak değil, P4 programlarının

belirli bir hedef mimari üzerinde nasıl gerçekleştirilebileceğini tanımlayan daha somut bir mimari spesifikasyon olarak ele alınmalıdır.

4.3. V1Model ve BMv2

V1Model, P4 programlarının özellikle eğitim, prototipleme ve deneysel çalışmalar kapsamında geliştirilmesi ve test edilmesi amacıyla yaygın olarak kullanılan bir referans mimaridir. V1Model, P4 programında kullanılabilecek parser, ingress, egress ve deparser gibi temel veri düzlemi bileşenlerinin yanı sıra bu bileşenler arasındaki paket işleme akışını ve ilgili metadata yapılarını tanımlar. Bu nedenle V1Model, belirli bir fiziksel switch donanımını değil, P4 programının hedeflediği veri düzlemi mimarisini tanımlayan bir modeldir.

BMv2 (Behavioral Model version 2) ise P4 programlarının yazılım ortamında çalıştırılmasını sağlayan açık kaynaklı bir yazılım tabanlı hedef ve davranışsal modelleme platformudur. BMv2, fiziksel bir switch ASIC'inin yerine geçerek P4 programlarının paket işleme davranışlarının yazılım ortamında gözlemlenmesine, test edilmesine ve doğrulanmasına olanak sağlar. BMv2 farklı P4 mimarileriyle kullanılabildiğinden, V1Model ile BMv2'nin aynı kavramlar olarak değerlendirilmesi doğru değildir. Bu bağlamda V1Model mimariyi, BMv2 ise bu mimariyi yazılım ortamında gerçekleştirebilen hedef platformu ifade eder.

Bu ayrım, P4 derleme sürecinin anlaşılması açısından da önemlidir. `p4c`, P4 programlarını farklı hedef mimarilere yönelik çıktılara dönüştürebilen açık kaynaklı bir P4 derleyicisidir. BMv2 ile kullanım durumunda derleyicinin ilgili hedef ve mimariye yönelik arka uç seçenekleri kullanılır. Dolayısıyla `p4c-bmv2` ifadesinin Barefoot Networks'e ait bağımsız bir derleyici arka ucu olarak tanımlanması doğru değildir. Derleme sürecinde P4 programı, seçilen hedef mimari ve BMv2'nin ilgili gerçekleştirim özellikleri doğrultusunda uygun hedef çıktısına dönüştürülür.

Bu çerçevede V1Model ile BMv2 birbirinin alternatifi değildir. V1Model, P4 programının üzerinde tanımlandığı mimari modeli; BMv2 ise bu programın yazılım ortamında çalıştırılmasını sağlayan hedef platformu ifade eder. Bu nedenle P4 geliştirme sürecinde “V1Model hedefi” ve “BMv2 hedefi” ifadelerinin aynı anlamda kullanılmasından kaçınılması, mimari ile hedef platform arasındaki ayrımın korunması açısından önemlidir.

4.4. PNA

PNA (Portable NIC Architecture), P4 programlanabilirliğinin NIC (Network Interface Card) ve SmartNIC gibi ağ arabirimi cihazlarında kullanılmasını desteklemek amacıyla geliştirilmiş bir hedef mimari spesifikasyondur. PNA, özellikle host sistemi ile ağ arasında gerçekleşen paket alışverişinin ve cihaz üzerindeki veri düzlemi işlemlerinin programlanabilir bloklar aracılığıyla modellenmesini amaçlar. Bu kapsamda paketlerin ağ tarafından alınması, host

sistemine yönlendirilmesi veya host sisteminden gelen paketlerin ağ arayüzüne iletilmesi gibi farklı paket işleme yolları mimari kapsamında ele alınır [6].

PNA, NIC ve SmartNIC cihazlarında ortak olarak bulunabilecek programlanabilir veri düzlemi bileşenlerini ve bunlar arasındaki paket işleme yollarını tanımlayarak farklı hedefler arasında belirli ölçüde taşınabilirlik sağlamayı amaçlar. Bununla birlikte PNA, belirli bir NIC veya SmartNIC donanımının fiziksel gerçekleştirimini tanımlayan bir donanım tasarımı değildir. PNA'ya uygun hedefler; işlem kapasitesi, bellek kaynakları, paket işleme aşamaları ve donanıma özgü özellikler bakımından birbirlerinden farklı olabilir.

4.5. Hedefe Özgü Mimariler

P4 ekosisteminde, genel amaçlı mimari modellerin yanı sıra belirli donanım platformlarının veya üreticiye özgü veri düzlemi tasarımlarının işlevsel gereksinimlerini karşılamak üzere geliştirilen hedefe özgü mimariler de bulunmaktadır. Bu mimariler, P4 programlarının hedef donanımın sunduğu özel işlem yeteneklerinden ve donanıma özgü kaynaklarından yararlanmasına olanak tanımaktadır. Bu kapsamda özel metadata yapıları ve extern nesnelerinin yanı sıra paket aynalama (mirroring), çoklu yayın (multicast), kuyruk yönetimi (queue management) ve donanıma özgü diğer paket işleme mekanizmaları programlanabilir veri düzlemine dâhil edilebilmektedir.

Hedefe özgü mimariler, donanım kaynaklarının daha etkin kullanılmasını ve belirli ağ işlevlerinin platformun teknik özelliklerine uygun biçimde gerçekleştirilmesini sağlayabilmektedir. Bununla birlikte, bu mimariler aracılığıyla sunulan özel işlevlerin kullanılması, P4 programlarının farklı hedef platformlara taşınabilirliğini sınırlayabilmektedir. Dolayısıyla hedefe özgü mimarilerin tasarımında, donanım yeteneklerinden yararlanma ile mimariler arası uyumluluğun korunması arasındaki ilişkinin dikkate alınması gerekmektedir. Bu doğrultuda, hedefe özgü özellikler içeren P4 programlarının geliştirilmesi ve değerlendirilmesi sırasında kullanılan mimarinin, extern nesnelerinin ve platforma bağlı kısıtlamaların açıkça tanımlanması, elde edilen sonuçların tekrarlanabilirliği ve farklı hedeflerle karşılaştırılabilirliği açısından önem taşımaktadır.

Tablo 2.'de mimari kavramların karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 2. Mimari kavramların karşılaştırılması

Kavram	Türü / amacı	Temel özellik
PISA	Genel mimari model/paradigma	Programlanabilir parser–pipeline–deparser veri düzlemi yaklaşımı
PSA	Taşınabilir switch hedef mimarisi	Switch cihazlarının ortak programlanabilir bloklarını ve packet path'lerini tanımlar
V1Model	Referans/eğitim mimarisi	BMv2 tabanlı öğretim ve deneylerde yaygın olarak kullanılır
PNA	Taşınabilir NIC hedef mimarisi	NIC/SmartNIC veri düzlemlerinin ortak yeteneklerini modeller
TNA vb.	Hedefe özgü mimari	Belirli donanımın özel kaynak ve extern özelliklerine erişebilir

5. Match-Action İşleme ve Durum Bilgili Nesneler

5.1. Paket İşleme Modeli

P4 veri düzlemi işlemesini kavramsal olarak şu akışla ifade etmek mümkündür: paket alma → parser → ingress/işleme control → match-action tabloları ve eylemler → gerekli header değişiklikleri → deparser → çıkış yolu. PSA gibi mimarilerde ingress ve egress tarafında birden fazla programlanabilir blok bulunabilir; dolayısıyla tek bir 'parser + tek pipeline + deparser' modelini bütün P4 hedeflerine genellemek doğru değildir [5].

Paket işleme süreci, programlanabilir veri düzlemi mimarilerinde belirli işlevsel aşamaların ardışık ve eşgüdümlü biçimde yürütülmesi esasına dayanır. Bu süreçte paketler, farklı işleme aşamalarından geçerken ilgili aşamaların gerektirdiği işlemler gerçekleştirilir. Pipeline mimarisi, farklı paketlerin aynı anda farklı işlem aşamalarında bulunmasına olanak tanıyarak veri düzleminin işlem verimliliğini artırır. Bununla birlikte, aşamaların sayısı, işlevleri ve eş zamanlı işlem kapasitesi kullanılan hedef mimariye ve donanımın kaynaklarına bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Bu nedenle P4 tabanlı paket işleme süreci, tüm hedefler için sabit bir aşama dizisi olarak değil, hedef mimarinin sunduğu programlanabilir bloklar çerçevesinde değerlendirilmelidir.

5.2. Veri Bağımlılıkları

P4 programlarının donanıma yerleştirilmesinde veri ve kontrol bağımlılıkları önemli rol oynar. Bir eylemin ürettiği değerin daha sonraki bir tablo veya eylem tarafından kullanılması, ilgili işlemlerin aynı veya sonraki pipeline aşamalarına yerleştirilmesini gerektirebilir. Bağımlılık zincirlerinin uzaması kaynak yerleşimini zorlaştırabilir.

RAW (Read After Write), WAR (Write After Read) ve WAW (Write After Write) gibi veri bağımlılığı türleri, P4 programlarının derleme ve hedef mimariye eşlenme süreçlerinde gerçekleştirilen bağımlılık analizlerinde kullanılan temel kavramlar arasındadır. Bununla birlikte, P4 programlarının pipeline aşamalarına yerleştirilmesi ve işlem sıralamasının belirlenmesi, yalnızca bu bağımlılık türleri dikkate alınarak açıklanamaz. Bu süreçte tablolar arasındaki işlevsel bağımlılıkların yanı sıra aritmetik ve mantıksal işlem birimlerinin (ALU) kullanılabilirliği, bellek erişim portlarının kapasitesi, eylem parametreleri, parser ve deparser kaynakları ile hedef mimariye özgü yerleşim kısıtlarının da birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

5.3. Donanım Kaynakları

P4 programının derlenmesi sırasında tablo anahtarları, bellekler, işlem kaynakları, pipeline aşamaları ve hedefe özgü diğer kaynaklar için bir yerleşim yapılır. Programın hedefe sığmaması durumunda compiler fitting/resource allocation hataları üretebilir.

P4 programlarının hedef donanıma eşlenmesi sürecinde kullanılabilir bellek kapasitesi, programın karmaşıklığını ve gerçekleştirilebilecek veri düzlemi işlemlerini doğrudan etkileyen önemli bir donanım kısıtıdır. SRAM (Static Random-Access Memory), yüksek erişim hızı ve düşük gecikme süresiyle öne çıkan, genellikle tablo verilerinin ve durum bilgilerinin saklanmasında kullanılan bir bellek türüdür. TCAM (Ternary Content-Addressable Memory) ise verilerin anahtar üzerinden içerik tabanlı olarak aranmasına ve 0, 1 veya "önemsiz" (wildcard) değerleriyle eşleştirme yapılmasına olanak sağlayan özel bir bellek türüdür. Bu bellek türlerinin kapasitesi ve kullanım biçimi, hedef donanımın mimarisine göre değişiklik gösterir. Bu nedenle, P4 programlarının bellek gereksinimleri değerlendirilirken yalnızca toplam bellek kapasitesi değil, bellek kaynaklarının tablolar, eşleştirme işlemleri ve diğer veri düzlemi bileşenleri arasında nasıl paylaştırıldığı da dikkate alınmalıdır. Özellikle yüksek kapasiteli tabloların veya yoğun durum bilgisi gerektiren işlemlerin tasarlanmasında, hedef donanımın bellek organizasyonunun ve kaynak sınırlarının göz önünde bulundurulması, programın başarılı bir şekilde derlenmesi ve yürütülmesi açısından önem taşımaktadır.

5.4. Hesaplama Sınırlamaları

P4 tabanlı veri düzlemlerinde yüksek paket işleme hızlarının sürdürülebilmesi, gerçekleştirilen hesaplama işlemlerinin hedef donanımın mimari özellikleri ve kaynak kapasitesiyle uyumlu olmasını gerektirmektedir. Bu doğrultuda P4 hedefleri, özellikle donanım tabanlı uygulamalarda, öngörülebilir yürütme süreleri ve sınırlı işlem kaynakları esas alınarak tasarlanmaktadır. Paket işleme süreçlerinin belirli bir gecikme sınırı içerisinde tamamlanması gereksinimi, kullanılabilecek işlem türlerini, işlem sıralamasını ve veri bağımlılıklarını doğrudan etkileyebilmektedir. Bununla birlikte, P4 hedeflerinin

hesaplama yetenekleri yalnızca temel aritmetik ve bit düzeyindeki işlemlerle sınırlı değildir. Hedef mimariye bağlı olarak özel aritmetik mantık birimleri (ALU), karma işlevleri gerçekleştiren donanım birimleri, kriptografik hızlandırıcılar ve extern nesneleri aracılığıyla sunulan özel işlem yetenekleri de kullanılabilmektedir.

P4 programlarında gerçekleştirilebilecek hesaplama işlemlerinin kapsamı ve verimliliği, kullanılan hedef platformun donanım mimarisine ve desteklediği işlem kümesine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Özellikle bölme, kayan noktalı sayı işlemleri, karmaşık döngü yapıları ve geniş durum makineleri gibi hesaplama açısından maliyetli işlemler, bazı hedeflerde desteklenme**yebilir** veya yüksek kaynak tüketimi nedeniyle verimli biçimde gerçekleştirilemeyebilir. Bu nedenle P4 programlarının tasarımında, yalnızca işlevsel gereksinimlerin karşılanması değil, aynı zamanda hedef donanımın hesaplama kapasitesinin, işlem kaynaklarının ve yürütme kısıtlarının da dikkate alınması gerekmektedir. Hedef mimarinin sunduğu işlem olanaklarına uygun bir programlama yaklaşımının benimsenmesi, veri düzlemi performansının korunması ve programın hedef platform üzerinde başarılı biçimde uygulanabilmesi açısından önem taşımaktadır.

6. P4 Derleme Süreci ve Hedefe Eşleme

6.1. Genel Derleme Modeli

P4 programlarının derlenmesi, kaynak kodda tanımlanan paket işleme davranışının hedef mimarinin teknik özellikleri ve kaynak kısıtlarıyla uyumlu bir biçimde yürütülebilir çıktılara dönüştürülmesini sağlayan çok aşamalı bir süreçtir. Bu süreç, kullanılan derleyiciye ve hedef platforma bağlı olarak farklılık gösterebilmekle birlikte, genel olarak kaynak kodun çözümlenmesi ve anlamsal açıdan doğrulanması, ara temsillerin oluşturulması, optimizasyon işlemlerinin gerçekleştirilmesi ve hedef mimariye özgü kod üretimi aşamalarını kapsamaktadır. Dolayısıyla P4 derleme sürecini bütün derleyici araç zincirleri için geçerli, sabit sayıda aşamadan oluşan bir yapı olarak değerlendirmek yerine, hedef mimarinin gereksinimlerine göre şekillenen esnek ve çok aşamalı bir iş akışı olarak ele almak daha uygundur **[**2,7**]**.

P4 derleyicileri, kaynak kodun analiz edilmesi ve hedef platforma eşlenmesi sürecinde ara temsil (Intermediate Representation, IR) yapılarından yararlanabilmektedir. Ara temsiller, kaynak kodda tanımlanan paket ayrıştırma, kontrol akışı, eşleşme-eylem tabloları ve diğer veri düzlemi işlemlerinin derleyici tarafından işlenebilir bir biçimde ifade edilmesini sağlar. Bu sayede program üzerinde optimizasyon, dönüşüm ve hedef mimarinin gereksinimlerine uygunluk analizleri gerçekleştirilebilir. Bununla birlikte, P4 ekosisteminde bütün derleyiciler tarafından kullanılan tek ve evrensel bir ara temsil standardı bulunmamaktadır. Ara temsilin yapısı, kapsamı ve kullanım biçimi, ilgili derleyicinin ve araç zincirinin tasarımına bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

P4C gibi derleyicilerde gerçekleştirilen derleme işlemleri, genel olarak dilin sözdizimsel ve anlamsal kurallarının denetlenmesiyle başlamakta, ardından hedef mimariye özgü dönüşüm ve optimizasyon aşamalarıyla devam etmektedir. Bu aşamalarda programın hedef platform tarafından desteklenen işlem yapılarına, bellek kaynaklarına ve veri düzlemi işlem hattı (pipeline) kısıtlarına uygunluğu değerlendirilir. Son aşamada ise hedef platformun gereksinimlerine bağlı olarak ilgili donanım veya yazılım ortamında kullanılabilecek çıktılar üretilir. Bu çıktılar, hedef mimariye özgü yürütülebilir dosyaları, yapılandırma verilerini veya kontrol düzlemi uygulamalarının ihtiyaç duyduğu metadata bilgilerini içerebilir. Böylece P4 derleme süreci, yalnızca kaynak kodun makine tarafından yürütülebilir bir biçime dönüştürülmesini değil, aynı zamanda programın hedef mimarinin işlevsel ve fiziksel kısıtlarıyla uyumlu hâle getirilmesini de kapsayan bütünleşik bir işlem olarak değerlendirilmektedir.

6.2. Hedef Çıktıları

P4 programının derlenmesi sonucunda elde edilen çıktıların niteliği, kullanılan derleyiciye ve hedef platforma bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle, her P4 derleme işleminin standart olarak `.bin` ve `P4Info` olmak üzere iki temel çıktı ürettiği şeklinde genelleme yapmak doğru değildir. Yazılım tabanlı hedeflerde, örneğin BMv2 ortamında, P4 programının hedef davranışını tanımlayan JSON biçimli veya hedefe özgü yapılandırma dosyaları oluşturulabilir. Buna karşılık ASIC, FPGA ve SmartNIC gibi donanım tabanlı hedeflerde, üreticiye ve hedef mimariye bağlı olarak farklı binary, konfigürasyon, tablo veya donanım programlama çıktıları üretilebilmektedir.

P4Info, özellikle P4Runtime protokolünü kullanan sistemlerde kontrol düzlemi ile veri düzlemi arasındaki etkileşimin sağlanması açısından önemli bir çıktıdır. P4Info dosyası; P4 programında tanımlanan tablolar, action'lar, counter'lar, meter'lar ve diğer P4Runtime nesneleri hakkında makine tarafından işlenebilir metadata sağlar [4]. Böylece kontrol düzlemi uygulaması, hedefte çalışan P4 programının tanımladığı nesneleri ve bunlara ilişkin kimlikleri programın kaynak kodunu doğrudan incelemesine gerek kalmadan tanıyabilir. Bununla birlikte, P4Info bir hedef donanımın çalıştıracağı fiziksel programlama kodunu veya binary imajını temsil etmez. Başka bir ifadeyle, P4Info daha çok kontrol düzleminin P4 programını tanımasını sağlayan bir arayüz tanımı niteliğindeyken, hedefe özgü binary veya konfigürasyon çıktısı veri düzleminin ilgili platform üzerinde gerçekleştirilmesi için kullanılır.

6.3. Hedefe Sığdırma ve Cetus

P4 programlarının programlanabilir switch ASIC'lerinin sahip olduğu sınırlı donanım kaynakları içerisinde gerçekleştirilebilmesi, P4 tabanlı veri düzlemi

uygulamalarında önemli bir derleme ve optimizasyon problemidir. Bir P4 programının işlevsel olarak doğru olması, programın hedef donanım üzerinde doğrudan gerçekleştirilebileceği anlamına gelmemektedir. Programın action sayısı, tablo yapıları, bellek kullanımı, işlem aşamaları ve action'lar arasındaki bağımlılıklar gibi unsurlar, hedef mimarinin kaynak ve zamanlama kısıtlarıyla uyumlu olmalıdır.

Cetus, hedef kaynaklarına sığmayan P4 programlarının, işlevsel davranışları mümkün olduğunca korunarak hedef platformun kaynak kısıtları içerisinde gerçekleştirilebilecek bir biçime dönüştürülmesini amaçlayan bir araştırma sistemidir. Cetus'un çalışma alanlarından biri, özellikle uzun action bağımlılık zincirlerinin (action dependency chains) hedefe sığdırma problemlerine etkisidir. Bir action'ın çıktısının başka bir action tarafından kullanılmasına bağlı olarak oluşan bu bağımlılıklar, programın donanım üzerinde gerçekleştirilebileceği işlem aşamalarını ve kaynak kullanımını kısıtlayabilmektedir [8].

Cetus'un amacı, herhangi bir P4 programını herhangi bir donanım platformuna otomatik olarak uyarlamak değildir. Sistem, belirli bir hedef mimarinin kaynak kısıtları altında, program dönüşümü ve sentez süreçlerini desteklemeye yönelik bir araştırma yaklaşımı sunmaktadır. Bu yönüyle Cetus, P4 programlarının yalnızca işlevsel doğruluğunu değil, aynı zamanda hedef donanımın kaynak ve gerçekleştirme kısıtlarını da dikkate alan derleme ve optimizasyon çalışmalarına örnek oluşturmaktadır.

7. Kontrol Düzlemi, P4Runtime ve P4Info

7.1. P4 ile Çalışma Zamanı Yönetiminin Ayrılması

P4 kaynak kodu ile çalışma zamanı sırasında kullanılan tablo girdileri, veri düzlemi programlamasının farklı katmanlarını ifade eder. P4 programı; paket başlıklarının yapısını, parser ve deparser davranışını, tabloları, action'ları, metadata alanlarını ve veri düzleminin genel paket işleme mantığını tanımlar. Buna karşılık, çalışma zamanı sırasında tabloların hangi girdilerle doldurulacağı ve bu girdilerin hangi eşleştirme koşulları ile action parametrelerini içereceği kontrol düzlemi tarafından belirlenebilir. Böylece P4 programının derlenmesi sırasında tanımlanan veri düzlemi davranışı ile çalışma zamanı sırasında değiştirilebilen tablo durumu birbirinden ayrılmış olur.

Bu ayrım, P4 tabanlı sistemlerde programın yeniden derlenmesine gerek kalmadan belirli paket işleme davranışlarının çalışma zamanında değiştirilmesine olanak sağlar. Örneğin bir P4 programında tanımlanan yönlendirme tablosunun yapısı ve bu tabloya uygulanabilecek action'lar kaynak kodunda belirlenirken, belirli bir hedef IP adresine karşılık hangi çıkış portunun kullanılacağı gibi tablo girdileri çalışma zamanında kontrol düzlemi tarafından oluşturulabilir veya güncellenebilir. Böylece veri düzlemi, önceden tanımlanmış işlem mantığını

korurken kontrol düzlemi ağın güncel durumuna göre gerekli tablo durumunu yönetebilir.

P4Runtime, P4 ile tanımlanmış bir veri düzleminin kontrol düzlemi tarafından programlanmasını ve yönetilmesini sağlayan üreticiden bağımsız (vendor-independent) bir kontrol düzlemi API spesifikasyonudur. P4Runtime aracılığıyla kontrol düzlemi uygulaması; P4 programında tanımlanan tabloların, action'ların ve diğer desteklenen çalışma zamanı nesnelerinin durumunu hedef cihaza aktarabilir, sorgulayabilir ve güncelleyebilir. Bu sayede kontrol düzlemi uygulamasının belirli bir donanım üreticisinin özel yönetim arayüzüne bağımlılığı azaltılır. P4Runtime spesifikasyonu P4.org tarafından yayımlanmaktadır [4].

7.2. P4Runtime ile Gerçekleştirilebilen İşlemler

P4Runtime aracılığıyla kontrol düzlemi, hedef cihaz ve ilgili P4 programına ait P4Info ile uyumlu olmak koşuluyla veri düzlemindeki çeşitli çalışma zamanı nesnelerini yönetebilir. Bu kapsamda tablolara yeni girdiler eklenebilir, mevcut girdiler güncellenebilir veya silinebilir. Tablolarla ilişkili action'ların parametreleri belirlenebilir ve değiştirilebilir. Bunun yanı sıra, desteklenen sayaç (counter) ve meter nesnelerinin durumları okunabilir; register gibi durum tutan nesneler ise hedef mimarinin ve P4Runtime API'sinin sağladığı olanaklar çerçevesinde okunabilir veya güncellenebilir [4].

P4Runtime'ın sağladığı işlevler yalnızca tablo girdilerinin yönetimiyle sınırlı değildir. PacketIn ve PacketOut mekanizmaları, kontrol düzlemi ile veri düzlemi arasında paket tabanlı etkileşim kurulmasına olanak sağlar. Örneğin veri düzleminden kontrol düzlemine gönderilmesi gereken bir paket PacketIn mekanizması üzerinden iletilebilirken, kontrol düzlemi tarafından oluşturulan veya işlenmesi istenen bir paket PacketOut aracılığıyla veri düzlemine aktarılabilir. Bu mekanizmalar, kontrol düzlemi uygulamasının veri düzlemiyle yalnızca tablo durumu üzerinden değil, gerektiğinde paket alışverişi üzerinden de etkileşim kurmasını sağlar [4].

Dolayısıyla P4Runtime ile kontrol düzlemi–veri düzlemi iletişimi yalnızca “tablo kuralı ekleme” işlemiyle sınırlandırılmamalıdır. P4Runtime; tablo ve action yönetiminin yanı sıra sayaç ve meter bilgilerinin okunması, desteklenen durum tutan nesnelerin yönetimi ve PacketIn/PacketOut gibi paket tabanlı iletişim mekanizmaları aracılığıyla veri düzleminin çalışma zamanında yönetilmesini sağlayan daha kapsamlı bir kontrol arayüzü sunmaktadır. Bununla birlikte, kullanılabilecek işlemlerin kapsamı hedef mimarinin yetenekleri, P4 programında tanımlanan nesneler ve ilgili P4Runtime sürümünün sunduğu özelliklerle sınırlıdır.

7.3. P4Info

P4Info, bir P4 programında tanımlanan ve kontrol düzlemi açısından anlam taşıyan nesneler hakkında makine tarafından işlenebilir bilgiler sağlayan bir metadata tanımıdır. P4 programının kendisinden farklı olarak P4Info, veri düzleminin paket işleme davranışını gerçekleştirmez; kontrol düzleminin bu veri düzlemiyle nasıl etkileşim kurabileceğine ilişkin bilgileri sunar. Bu kapsamda tablo kimlikleri, tabloların eşleştirme alanları, action'lar ve bunlara ait parametreler ile counter, meter ve diğer desteklenen P4 nesnelerine ilişkin bilgiler P4Info içerisinde tanımlanabilir [4].

P4Runtime kullanan kontrol düzlemi uygulamaları, P4Info içeriğinden yararlanarak hedefte çalışan P4 programının kontrol edilebilir veri düzlemi modelini tanıyabilir. Örneğin bir kontrol düzlemi uygulaması, bir tablonun kimliğini, hangi alanlar üzerinde eşleştirme yapılabileceğini ve ilgili action'ların hangi parametrelere sahip olduğunu P4Info üzerinden öğrenebilir. Böylece kontrol düzlemi uygulamasının P4 kaynak kodunu doğrudan çözümlemesine gerek kalmadan, P4Runtime aracılığıyla hedef veri düzlemiyle etkileşim kurması mümkün olur [4].

P4Info'nun hedefe özgü yürütülebilir bir dosya olmadığı özellikle vurgulanmalıdır. P4Info, hedef donanım üzerinde doğrudan çalıştırılan bir binary veya veri düzlemi programı değildir. Bunun yerine, P4 programı ile kontrol düzlemi arasındaki etkileşimi tanımlayan bilgileri taşıyan bir arayüz tanımı olarak değerlendirilmelidir. Hedef üzerinde P4 programının çalıştırılmasını sağlayan asıl çıktı ise kullanılan derleyiciye, hedef mimariye ve platforma bağlı olarak farklı biçimlerde oluşturulabilir.

Bu nedenle P4 tabanlı bir sistemde P4 kaynak kodu, veri düzleminin davranışını tanımlayan programı; hedefe özgü derleme çıktısı, bu davranışın ilgili platformda gerçekleştirilmesini sağlayan çıktıyı; P4Info ise kontrol düzleminin bu veri düzlemiyle nasıl etkileşim kuracağını açıklayan metadata tanımını ifade eder.

8. Geliştirme, Test ve Doğrulama Ortamları

P4 tabanlı veri düzlemi uygulamalarının geliştirilmesi yalnızca P4 programının yazılması ve derlenmesiyle sınırlı değildir. Programın hedef mimariye uygunluğunun değerlendirilmesi, yazılım tabanlı ortamlarda işlevsel olarak test edilmesi ve gerektiğinde daha kapsamlı ağ senaryoları içerisinde doğrulanması gerekir. Bu amaçla p4c, BMv2, Mininet ve ns-3 gibi farklı araç ve ortamlar birbirlerini tamamlayacak şekilde kullanılabilir.

8.1. p4c

p4c, P4 programlarını farklı hedef mimarilere yönelik olarak derlemek amacıyla kullanılan açık kaynaklı bir P4 derleyici projesidir. Derleme sürecinde

kullanılan arka uç (backend), hedef mimari tanımı ve ilgili derleyici seçeneklerine bağlı olarak oluşturulan çıktıların biçimi ve içeriği değişebilir. Bu nedenle p4c'nin bütün P4 hedefleri için aynı türde veya aynı yapıda çıktı ürettiği düşünülmemelidir.

p4c'nin temel işlevi, P4 kaynak kodunu seçilen hedefin gerektirdiği biçime dönüştürmektir. Bu dönüşüm sonucunda yazılım tabanlı bir hedef için farklı bir yapılandırma veya program tanımı, donanım tabanlı bir hedef için ise hedef üreticisinin gerektirdiği farklı derleme çıktıları oluşturulabilir. Dolayısıyla p4c, tek bir hedefe özgü derleyici olmaktan ziyade farklı hedeflere yönelik derleme süreçlerini destekleyen bir derleyici altyapısı olarak değerlendirilmelidir.

8.2. BMv2

BMv2 (Behavioral Model version 2), P4 programlarının yazılım ortamında çalıştırılmasını ve paket işleme davranışlarının incelenmesini sağlayan açık kaynaklı bir davranışsal model ailesidir. Özellikle P4 eğitimi, prototipleme, işlevsel test ve deneysel çalışmalar kapsamında yaygın olarak kullanılmaktadır. BMv2 ile birlikte uygun P4 mimarisi kullanılarak P4 programlarının fiziksel bir switch donanımına ihtiyaç duyulmadan geliştirilmesi ve test edilmesi mümkün olur.

Bununla birlikte BMv2'nin fiziksel bir P4 ASIC'inin performansını doğrudan temsil ettiği varsayılmamalıdır. BMv2 yazılım tabanlı bir model olduğundan işlem kapasitesi, paket başına işlem süresi, gecikme (latency), aktarım hızı (throughput) ve CPU ile bellek kullanımı gibi özellikleri fiziksel hedef donanımdan önemli ölçüde farklı olabilir. Bu nedenle BMv2 üzerinde elde edilen performans ölçümleri, aksi ayrıca doğrulanmadıkça belirli bir P4 ASIC'inin performansına doğrudan genellenmemelidir.

8.3. Mininet

Mininet, sanal ağ topolojileri oluşturmak ve host, switch ve bağlantılar arasındaki ağ etkileşimini emüle etmek amacıyla kullanılan bir ağ emülasyon ortamıdır. P4 tabanlı deneylerde Mininet, BMv2 gibi yazılım tabanlı P4 hedefleriyle birlikte kullanılarak birden fazla düğüm ve bağlantıdan oluşan ağ senaryolarının oluşturulmasına olanak sağlar.

Örneğin bir deney ortamında birden fazla sanal host, P4 destekli BMv2 switch'lerine bağlanabilir ve bu düğümler arasındaki paket iletimi gözlemlenebilir. Böylece yalnızca tek bir P4 switch üzerinde yapılan paket işleme testlerinin ötesine geçilerek yönlendirme, filtreleme, yük dengeleme veya diğer veri düzlemi işlevlerinin daha geniş ağ topolojileri içerisindeki davranışı incelenebilir.

8.4. Doğrulama ve test

P4 programlarının doğrulanması ve test edilmesinde farklı düzeylerde yöntemler kullanılabilir. İşlevsel testlerde belirli giriş paketleri oluşturularak beklenen çıkış paketleri veya veri düzlemi durumları kontrol edilebilir. Daha kapsamlı analizlerde ise hedef üzerinde test, sembolik yürütme, model checking ve ağ düzeyi deneyler gibi yöntemlerden yararlanılabilir. Bu yöntemlerin her biri P4 programının farklı özelliklerinin incelenmesine yönelik olup birbirlerinin tamamen yerine geçen yöntemler değildir.

Vera, P4 programlarını sembolik yürütme yaklaşımıyla analiz etmeye yönelik erken dönem araçlardan biridir. Söz konusu yaklaşım, belirli P4 programlarında parser ve deparser ile ilişkili hataların, tünelleme işlemlerindeki bazı sorunların ve belirli bellek erişimi sınıflarının tespit edilmesine yönelik analizler gerçekleştirebilmektedir [9]. Bununla birlikte, herhangi bir doğrulama aracının tespit edebileceği hata sınıfları aracın sürümüne, desteklediği P4 dil özelliklerine ve uyguladığı analiz yöntemlerine bağlıdır.

P4 programlarının bellek güvenliği ve çalışma zamanı davranışı değerlendirilirken C veya C++ gibi dillerde kullanılan kavramların doğrudan P4'e aktarılmasından kaçınılmalıdır. Özellikle “P4 memory-safe değildir ve C'deki gibi undefined behavior üretir” biçimindeki genel bir ifade, P4'ün dil semantiğini yeterince doğru yansıtmaz. P4'ün tip sistemi, header geçerlilik (header validity) modeli, alan erişim kuralları ve hedefe bağlı davranışları C/C++ dilinden farklıdır. Bu nedenle geçersiz header kullanımı, tanımlanmamış veya geçersiz değerlerle ilişkili durumlar ve hedefe bağlı davranışlar kendi bağlamları içerisinde ayrı ayrı değerlendirilmelidir [2,5].

8.5. P4sim ve ns-3

ns-3 tabanlı P4 simülasyon çalışmaları, P4 veri düzlemi davranışının daha geniş ağ topolojileri ve ayrık olaylı ağ simülasyonu içerisinde incelenmesine olanak sağlaması bakımından önem taşımaktadır. P4sim gibi çalışmaların temel amacı, P4 programlarının yalnızca tek bir yazılım tabanlı switch üzerinde değil, düğümler, bağlantılar, trafik modelleri ve zamanlama davranışlarıyla birlikte ele alınabildiği daha kapsamlı simülasyon ortamlarında değerlendirilmesini kolaylaştırmaktır.

Bununla birlikte, belirli bir P4sim gerçekleştirimini BMv2 ile birebir aynı semantiğe veya performansa sahip bir ortam olarak değerlendirmek doğru değildir. Bir simülatörün P4 programlarını nasıl modellediği, hangi P4 özelliklerini desteklediği ve paket işleme davranışını nasıl gerçekleştirdiği kullanılan sürüme ve çalışmanın tasarımına bağlıdır. Benzer şekilde simülasyon ortamında elde edilen performans sonuçları da doğrudan fiziksel P4 donanımının performansı olarak yorumlanmamalıdır.

9. Uygulama Alanları

9.1. Ağ güvenliği

P4, belirli güvenlik politikalarının veri düzeyinde ve paket işleme hattına yakın bir noktada uygulanmasına olanak sağlayabilir. Erişim kontrol listeleri (ACL), kaynak ve hedef adreslerinin doğrulanması, kaynak adresi sahteciliğinin (spoofing) önlenmesine yönelik kontroller, trafik sınıflandırma, belirli DDoS belirtilerine karşı hızlı filtreleme ve telemetri tabanlı güvenlik mekanizmaları bu kullanım alanlarına örnek olarak verilebilir [10,11]. Bu yaklaşımın temel avantajlarından biri, güvenlik politikalarının paket işleme sürecinin bir parçası hâline getirilebilmesi ve uygun hedeflerde bu işlemlerin yüksek paket işleme hızlarında gerçekleştirilebilmesidir.

Bununla birlikte, P4'ün kullanılması tek başına belirli bir güvenlik işlevinin veya performans düzeyinin garanti edilmesi anlamına gelmez. Örneğin "P4 ile terabit seviyesindeki her DDoS saldırısı hat hızında tespit edilir" biçimindeki genel bir ifade teknik açıdan doğru değildir. Elde edilebilecek performans; kullanılan hedef donanımın mimarisine ve kaynaklarına, paket boyutuna, tablo ve bellek kapasitesine, uygulanan algoritmanın işlem karmaşıklığına, trafik özelliklerine ve veri düzlemi ile kontrol düzlemi arasındaki etkileşimin niteliğine bağlıdır. Ayrıca bir saldırının veri düzleminde filtrelenebilmesi ile saldırının eksiksiz biçimde tespit edilmesi aynı problem değildir. Özellikle daha karmaşık saldırı tespit mekanizmalarında kontrol düzlemi, harici analiz sistemleri veya telemetri verilerinin birlikte kullanılması gerekebilir.

P4'ün güvenlik amacıyla kullanımında bir diğer önemli sınır, Derin Paket İncelemesi (Deep Packet Inspection, DPI) uygulamalarıdır. P4 veri düzleminde paket başlıklarının yanı sıra belirli koşullar altında paket yükünün sınırlı bölümleri de ayrıştırılabilir ve işlenebilir. Ancak genel amaçlı DPI sistemlerinde bulunan kapsamlı protokol çözümleme, durum takibi, içerik analizi ve karmaşık imza eşleştirme işlevlerinin tamamının her P4 hedefinde gerçekleştirilebileceği varsayılmamalıdır. Bu tür işlemlerin uygulanabilirliği; hedef mimarinin parser, bellek ve işlem kaynakları ile P4 programının karmaşıklığına bağlıdır.

Bu nedenle P4'ün ağ güvenliğindeki rolü, genel amaçlı bir güvenlik motorunun yerine geçmesinden ziyade, yüksek hızlı ve programlanabilir veri düzlemi güvenlik işlevlerinin gerçekleştirilmesi çerçevesinde değerlendirilmelidir. Özellikle paketlerin ilk işleme aşamalarında gerçekleştirilebilen basit ve belirli güvenlik kontrolleri P4 için uygun kullanım alanları oluştururken, daha karmaşık analizlerin veri düzlemi, kontrol düzlemi ve harici güvenlik bileşenlerinin birlikte kullanıldığı çok katmanlı bir mimari içerisinde ele alınması gerekebilir.

9.2. DDoS Tespiti ve Azaltma

P4 ile sayaçlar, meter'lar, hash tabanlı yapılar ve tablo eşleşmeleri kullanılarak belirli trafik örüntülerinin hızlı biçimde tespit edilmesine yönelik veri düzlemi mekanizmaları geliştirilebilir. Makine öğrenmesi tabanlı DDoS çalışmaları da P4 veri düzleminin hızlı özellik çıkarımı ve sınıflandırma süreçlerinde kullanılabileceğini göstermektedir [12]. Ancak karmaşık model çıkarımı veya büyük durum alanı gerektiren algoritmalar çoğu durumda kontrol düzlemi veya harici işlem kaynaklarıyla birlikte tasarlanır.

9.3. Ağ izleme ve In-band Network Telemetry

In-band Network Telemetry (INT), paketlerin ağ üzerinden ilerleyişi sırasında veri düzlemi durum bilgilerinin paketlere eklenmesini veya telemetri raporlarının oluşturulmasını amaçlar. Zaman damgaları, port bilgileri, kuyruk durumu ve benzeri ölçümler belirli INT tasarımlarında toplanabilir [3].

INT, ping veya traceroute'un basit bir alternatifi olarak değil, ağ veri düzlemi hakkında daha ayrıntılı ve paketle ilişkili ölçüm sağlayabilen bir telemetri yaklaşımı olarak ele alınmalıdır.

9.4. Yük Dengeleme

P4, akışların belirli ölçütlere göre sınıflandırılması ve farklı çıkış yollarına yönlendirilmesi için kullanılabilir. Özellikle yüksek hızlı switch'lerde akış tabanlı yük dengeleme, ECMP benzeri seçim mekanizmaları ve durum bilgili veri düzlemi yaklaşımları araştırılmıştır.

9.5. Özel Kapsülleme ve Protokoller

P4'ün protokol bağımsızlığı, özel header formatlarının veya mevcut protokollerin özel işleme kurallarının uygulanmasına olanak verir. VXLAN gibi mevcut protokollerin ayrıştırılması ve işlenmesi veya araştırma amaçlı yeni header formatlarının denenmesi P4 ile gerçekleştirilebilir. Ancak protokolün standartlaştırılması, ağın tamamında birlikte çalışabilirlik ve güvenlik doğrulaması P4 programının kendisinden daha geniş konulardır.

9.6. SmartNIC ve NIC Veri Düzlemleri

P4, yalnızca switch ASIC'leriyle sınırlı değildir. PNA gibi mimariler NIC ve SmartNIC veri düzlemlerindeki programlanabilirliği standartlaştırma amacı taşır [6]. SmartNIC üzerinde paket filtreleme, telemetry, offload ve belirli ağ fonksiyonlarının veri düzleminde gerçekleştirilmesi P4'ün önemli uygulama yönlerinden biridir.

10. Zorluklar ve Sınırlamalar

10.1. Donanım Kaynakları

P4 programlarının en önemli pratik sınırlamalarından biri hedef kaynaklarına sığma problemidir. Pipeline aşamalarının sayısı, tablo kapasitesi, SRAM/TCAM kaynakları, action karmaşıklığı, metadata genişliği, register sayısı ve diğer mimari kaynaklar hedefe göre değişir.

Bu nedenle belirli bir switch modeli belirtilmeden sabit bellek miktarı veya sabit pipeline stage sayısı vermek akademik açıdan uygun değildir. Örneğin belirli bir Intel Tofino nesli veya başka bir hedef için verilen stage sayısı, tüm P4 donanımlarına genellenmemelidir.

10.2. Durum Saklama

Register gibi veri düzlemi durum nesneleri güçlü bir mekanizma olmakla birlikte, sınırlı bellek ve eşzamanlı erişim koşulları nedeniyle dikkatle kullanılmalıdır. Çok sayıda akışın ayrıntılı durumunu saklamak, hedefin bellek kapasitesini aşabilir. Yaklaşık ölçüm için sketch gibi olasılıksal veri yapıları bu nedenle araştırmalarda önemli bir yer tutmaktadır.

10.3. Hesaplama Karmaşıklığı

P4, genel amaçlı programlama dillerindeki tüm kontrol ve hesaplama yapılarını sunmaz. Dinamik bellek, serbest biçimli pointer işlemleri ve sınırsız döngüler gibi yapılar P4 programlama modelinin temel parçaları değildir. Bu durum, yüksek hızlı ve öngörülebilir paket işleme için avantaj sağlarken karmaşık algoritmaların doğrudan veri düzlemine taşınmasını zorlaştırabilir.

10.4. Kontrol Düzlemi ile Etkileşim

P4 veri düzlemi ile kontrol düzlemi arasındaki sürekli iletişim, bazı algoritmalarda performans ve gecikme maliyeti oluşturabilir. Bu nedenle yüksek frekanslı ve paket başına karar verilmesi gereken işlemlerin mümkün olduğunca veri düzleminde; daha karmaşık veya uzun süreli kararların ise kontrol düzleminde gerçekleştirilmesi yaygın bir tasarım yaklaşımıdır.

10.5. Taşınabilirlik

P4 dilinin taşınabilir olması ile P4 uygulamasının taşınabilir olması aynı şey değildir. Standart mimariler taşınabilirliği artırsa da hedefe özgü extern'ler, metadata, kaynak kapasitesi, parser sınırlamaları ve compiler kısıtları programın başka bir cihaza taşınmasını zorlaştırabilir.

Taşınabilirliği artırmak için ortak architecture API'lerinin kullanılması, hedefe özgü extern'lerin azaltılması, kaynak tüketiminin düşük tutulması ve programın birden fazla hedefte test edilmesi gerekir.

10.6. Doğrulama ve Hata Ayıklama

P4 programlarının hata ayıklanması, geleneksel uygulama yazılımlarına göre farklıdır. Parser geçişleri, header validity, match-action bağımlılıkları, pipeline yerleşimi ve hedef kaynakları birlikte incelenmelidir. Hatanın yalnızca kaynak koddan değil, hedef architecture veya compiler fitting aşamasından kaynaklanabileceği de göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu nedenle test stratejisi; statik analiz, hedef bağımsız testler, BMv2 tabanlı fonksiyonel testler ve mümkünse gerçek hedef üzerinde doğrulama aşamalarını içermelidir.

10.7. Kriptografi ve Karmaşık İşlemler

P4 veri düzleminde kriptografik işlemlerin uygulanabilirliği hedefe bağlıdır. Bazı hedeflerde kriptografik extern'ler veya hızlandırıcılar bulunabilir; başka hedeflerde aynı işlemi P4 ile gerçekleştirmek mümkün veya verimli olmayabilir. AES, MACsec veya IPsec gibi isimlerin P4'ün doğal ve her hedefte kullanılabilir özellikleriymiş gibi verilmesi bu nedenle yanıltıcıdır.

11. Örnek P4 Programı ve İş Akışı

Aşağıdaki örnek, IPv4 paketlerinin hedef IP adresine göre bir çıkış portuna yönlendirilmesini gösteren kavramsal bir P4_16 yapısını temsil etmektedir. Örneğin belirli architecture dosyaları ve hedefe özgü metadata tanımları kullanılmadığı için kodun doğrudan her hedefte derlenmesi beklenmemelidir.

```
#include <core.p4>
#include <v1model.p4>

// ---------------------------------------------------------------
-------------
// 1. BAŞLIK VE METADATA TANIMLARI
// ---------------------------------------------------------------
-------------

header ethernet_t {
    bit<48> dstAddr;
    bit<48> srcAddr;
    bit<16> etherType;
}

header ipv4_t {
    bit<4>   version;
    bit<4>   ihl;
    bit<8>   diffserv;
    bit<16>  totalLen;
    bit<16>  identification;
    bit<3>   flags;
    bit<13>  fragOffset;
    bit<8>   ttl;
```

```
    bit<8>   protocol;
    bit<16>  hdrChecksum;
    bit<32>  srcAddr;
    bit<32>  dstAddr;
}

struct headers_t {
    ethernet_t ethernet;
    ipv4_t     ipv4;
}

struct metadata_t {
    bit<9> egress_port;
}

// ---------------------------------------------------------------
-------------
// 2. PARSER (AYRIŞTIRICI FSM)
// ---------------------------------------------------------------
-------------

parser MyParser(packet_in pkt,
                out headers_t hdr,
                inout metadata_t meta,
                inout standard_metadata_t standard_metadata) {

    state start {
        transition parse_ethernet;
    }

    state parse_ethernet {
        pkt.extract(hdr.ethernet);
        transition select(hdr.ethernet.etherType) {
            0x0800: parse_ipv4;
            default: accept;
        }
    }

    state parse_ipv4 {
        pkt.extract(hdr.ipv4);
        transition accept;
    }
}

// ---------------------------------------------------------------
-------------
// 3. CHECKSUM DOĞRULAMA (OPSİYONEL/GEREKLİ BLOK)
// ---------------------------------------------------------------
-------------

control MyVerifyChecksum(inout headers_t hdr, inout metadata_t
meta) {
    apply { }
}

// ---------------------------------------------------------------
-------------
```

```
// 4. INGRESS CONTROL (İŞLEME MANTIĞI)
// ------------------------------------------------------------
-------------

control MyIngress(inout headers_t hdr,
                  inout metadata_t meta,
                  inout standard_metadata_t standard_metadata) {

    action drop() {
        mark_to_drop(standard_metadata);
    }

    action set_port(bit<9> port) {
        // Çıkış portunu mimari metadata'ya yaz
        standard_metadata.egress_spec = port;
        // TTL değerini 1 azalt
        hdr.ipv4.ttl = hdr.ipv4.ttl - 1;
    }

    table ipv4_lpm {
        key = {
            hdr.ipv4.dstAddr: lpm;
        }
        actions = {
            set_port;
            drop;
        }
        size = 1024;
        default_action = drop();
    }

    apply {
        if (hdr.ipv4.isValid() && hdr.ipv4.ttl > 1) {
            ipv4_lpm.apply();
        } else if (hdr.ipv4.isValid() && hdr.ipv4.ttl <= 1) {
            drop();
        }
    }
}

// ------------------------------------------------------------
-------------
// 5. EGRESS CONTROL
// ------------------------------------------------------------
-------------

control MyEgress(inout headers_t hdr,
                 inout metadata_t meta,
                 inout standard_metadata_t standard_metadata) {
    apply { }
}

// ------------------------------------------------------------
-------------
// 6. CHECKSUM HESAPLAMA
// ------------------------------------------------------------
-------------
```

```
control MyComputeChecksum(inout headers_t hdr, inout metadata_t
meta) {
    apply {
        update_checksum(
            hdr.ipv4.isValid(),
            {
                hdr.ipv4.version,
                hdr.ipv4.ihl,
                hdr.ipv4.diffserv,
                hdr.ipv4.totalLen,
                hdr.ipv4.identification,
                hdr.ipv4.flags,
                hdr.ipv4.fragOffset,
                hdr.ipv4.ttl,
                hdr.ipv4.protocol,
                hdr.ipv4.srcAddr,
                hdr.ipv4.dstAddr
            },
            hdr.ipv4.hdrChecksum,
            HashAlgorithm.csum16
        );
    }
}

// ----------------------------------------------------------------
-------------
// 7. DEPARSER (GEÇERLİ BAŞLIKLARI SERİLEŞTİRİCİ)
// ----------------------------------------------------------------
-------------

control MyDeparser(packet_out pkt, in headers_t hdr) {
    apply {
        // Yalnızca isValid() == true olan başlıklar belirtilen
sırada serileştirilir
        pkt.emit(hdr.ethernet);
        pkt.emit(hdr.ipv4);
    }
}

// ----------------------------------------------------------------
-------------
// 8. MAIN (MİMARİ ÖRNEKLEME / ANA GİRİŞ NOKTASI)
// ----------------------------------------------------------------
-------------

V1Switch(
    MyParser(),
    MyVerifyChecksum(),
    MyIngress(),
    MyEgress(),
    MyComputeChecksum(),
    MyDeparser()
) main;
```

Bu örnekte parser IPv4 header'ını çıkarır; control bloğu hedef IP adresini LPM tablosunda arar ve eşleşmeye göre çıkış portu bilgisini metadata'ya yazar. Gerçek

bir switch mimarisinde bu metadata'nın hangi alana karşılık geldiği, paketin egress pipeline'a nasıl taşındığı ve fiziksel porta nasıl gönderildiği seçilen architecture tarafından belirlenir.

Dolayısıyla aynı kaynak kodun gerçek bir cihazda kullanılabilmesi için architecture tanımı, gerekli include dosyaları, intrinsic metadata ve hedefe özgü çıkış portu mekanizmaları tamamlanmalıdır.

Tipik geliştirme iş akışı şu aşamalardan oluşur:

1. Hedef platform ve desteklenen P4 architecture belirlenir.

2. Paket formatları ve gerekli header/metadata yapıları tanımlanır.

3. Parser ile paket başlıklarının ayrıştırılması gerçekleştirilir.

4. Match-action tabloları ve action'lar tasarlanır.

5. Kontrol akışı ve gerekli stateful nesneler oluşturulur.

6. Deparser ile çıkış paketinin oluşturulma sırası tanımlanır.

7. Program p4c veya hedefe özgü toolchain ile derlenir.

8. Compiler çıktıları ve kaynak kullanım raporları incelenir.

9. Önce BMv2 gibi yazılım hedefinde fonksiyonel testler yapılabilir.

10. P4Runtime gerekiyorsa P4Info kullanılarak kontrol düzlemi uygulaması geliştirilir.

11. Son olarak gerçek hedefte performans, doğruluk ve kaynak kullanımı doğrulanır.

12. Genel Değerlendirme

P4, ağ veri düzlemlerinin paket işleme davranışını programlanabilir hâle getiren bir dildir. P4'ün temel katkısı, paket formatlarının ve işleme mantığının sabit bir protokol kümesine bağlı kalmadan programlanabilmesini sağlamasıdır. Bununla birlikte P4, tek başına bütün ağ cihazının işletim sistemi, kontrol düzlemi veya donanım yönetim mekanizması değildir.

Akademik olarak P4'ü değerlendirirken dört katmanın birbirinden ayrılması gerekir: (1) P4_16 dilinin sözdizimi ve semantiği, (2) hedef architecture'ın sunduğu programlanabilir bloklar ve extern'ler, (3) compiler/toolchain'in programı hedefe eşlemesi ve (4) P4Runtime gibi kontrol düzlemi API'leriyle çalışma zamanı yönetimi. Bu ayrım yapılmadığında P4 dilinin yetenekleri ile belirli bir donanımın özellikleri birbirine karıştırılabilmektedir.

PISA genel bir programlanabilir switch mimari modelini ifade ederken PSA belirli bir taşınabilir switch mimarisidir. V1Model daha çok BMv2 tabanlı eğitim ve referans deneylerinde kullanılan bir mimaridir; PNA ise NIC/SmartNIC

hedeflerini ele alır. Hedefe özgü mimariler ise programcıya daha fazla donanım özelliği sağlayabilir, ancak taşınabilirliği azaltabilir.

P4Runtime, P4 programının kendisi değildir. P4 programı veri düzleminin genel davranışını tanımlar; P4Runtime ise bu veri düzleminin çalışma zamanında kontrol edilmesi için kullanılan standartlaştırılmış bir API yaklaşımıdır. P4Info da hedef binary'si değil, kontrol düzleminin P4 nesnelerini tanımasına yardımcı olan metadata bilgisidir.

P4'ün güçlü yönleri; protokol bağımsızlığı, programlanabilir veri düzlemi, yüksek hızlı paket işleme için donanım hedeflerine eşlenebilme, telemetri ve güvenlik uygulamalarında özelleştirilebilirlik ve yeni veri düzlemi fikirlerinin hızlı prototiplenebilmesidir. Buna karşılık kaynak kısıtları, hedef bağımlılıkları, compiler fitting problemleri, sınırlı hesaplama modeli, doğrulama güçlükleri ve gerçek donanım ile yazılım simülasyonu arasındaki farklar temel sınırlamalar olarak dikkate alınmalıdır.

Sonuç olarak P4, 'her türlü ağ işlemini sınırsız biçimde gerçekleştiren bir programlama dili' olarak değil, belirli bir hedef mimarinin veri düzlemi üzerinde paket işleme davranışını yüksek performansla ve programlanabilir biçimde tanımlamayı amaçlayan bir dil olarak değerlendirilmelidir. Bu yaklaşım, P4'ün hem akademik araştırmalardaki hem de üretim sistemlerindeki rolünü daha doğru biçimde ortaya koymaktadır.

Kaynaklar

[1] Bosshart, P., Daly, D., Gibb, G., Izzard, M., McKeown, N., Rexford, J., & Walker, D. (2014). P4: Programming protocol-independent packet processors. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 44(3), 87-95.

[2] P4 Language Consortium. (2024). P4_16 Language Specification, Version 1.2.5. P4.org.

[3] P4 Language Consortium. (2026). P4 Language and Related Specifications. P4.org. (P4_16, P4Runtime, PSA, PNA ve INT spesifikasyonları)

[4] P4.org API Working Group. (2026). P4Runtime Specification, Version 1.5.0. P4.org.

[5] P4.org Architecture Working Group. (2022). P4_16 Portable Switch Architecture (PSA), Version 1.2. P4.org.

[6] P4.org Architecture Working Group. (2022). P4 Portable NIC Architecture (PNA), Version 0.7. P4.org. (Çalışma taslağı.)

[7] The P4.org Applications Working Group. (2020). In-band Network Telemetry (INT) Dataplane Specification Version 2.1. P4.org.

[8] Li, Y., Gao, J., Zhai, E., Liu, M., Liu, K., & Liu, H. H. (2022). Cetus: Releasing p4 programmers from the chore of trial and error compiling. In 19th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 22) (pp. 371-385).

[9] Stoenescu, R., Dumitrescu, D., Popovici, M., Negreanu, L., & Raiciu, C. (2018, August). Debugging P4 programs with Vera. In Proceedings of the 2018 Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (pp. 518-532).

[10] AlSabeh, A., Khoury, J., Kfoury, E., Crichigno, J., & Bou-Harb, E. (2022). A survey on security applications of P4 programmable switches and a STRIDE-based vulnerability assessment. Computer networks, 207, 108800.

[11] Mazloum, A., AlSabeh, A., Kfoury, E., & Crichigno, J. (2025). Security applications in P4: Implementation and lessons learned. Computer Networks, 257, 111011.

[12] Musumeci, F., Fidanci, A. C., Paolucci, F., Cugini, F., & Tornatore, M. (2022). Machine-learning-enabled ddos attacks detection in p4 programmable networks. Journal of Network and Systems Management, 30(1), 21.

[13] Liatifis, A., Sarigiannidis, P., Argyriou, V., & Lagkas, T. (2023). Advancing sdn from openflow to p4: A survey. ACM Computing Surveys, 55(9), 1-37.

[14] Wang, H., Soulé, R., Dang, H. T., Lee, K. S., Shrivastav, V., Foster, N., & Weatherspoon, H. (2017, April). P4fpga: A rapid prototyping framework for p4. In Proceedings of the Symposium on SDN Research (pp. 122-135).

[15] Xing, J., Qiu, Y., Hsu, K. F., Sui, S., Manaa, K., Shabtai, O., & Chen, A. (2023, September). Unleashing SmartNIC packet processing performance in P4. In Proceedings of the ACM SIGCOMM 2023 Conference (pp. 1028-1042).

[16] Yürekten, Ö. (2022). Ağ veri katmanı programlama ve siber güvenlik. İçinde Ş. Sağıroğlu & S. Akleylek (Ed.), Siber Güvenlik ve Savunma Kitap Serisi (6. Kitap): Siber Güvenlik Ontolojisi, Tehditler ve Çözümler (ss. 259–292). Nobel Akademik Yayıncılık.

BÖLÜM 9

Rüzgâr Santrallerinde Enerji Verimliliği ve Yapısal Ömür: Çok Amaçlı Optimizasyon Yaklaşımları Üzerine Tematik Bir İnceleme

Ece Türkoğlu [1]
Deniz Türsel Eliiyi[2]

[1] İzmir Bakırçay Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı
ORCID: 0009-0007-8753-2737
[2] İzmir Bakırçay Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı
ORCID: 0000-0001-7693-3980

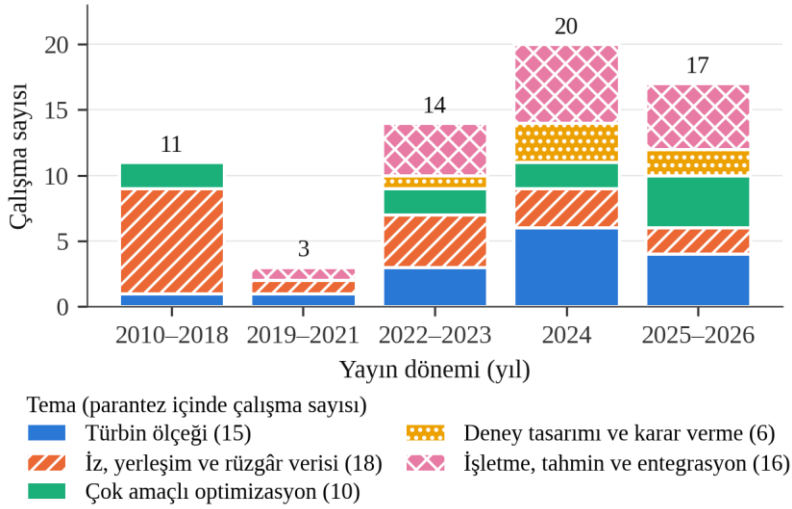
1. GİRİŞ

İklim değişikliğiyle mücadele ve enerji arzı güvenliği son yirmi yılda rüzgâr enerjisini elektrik üretiminin en hızlı büyüyen kaynaklarından biri hâline getirmiştir. Kurulu güç büyüdükçe "ne kadar enerji üretilebilir?" sorusunun yanında "bu enerji türbinlerin ömrünü kısaltmadan nasıl üretilebilir?" sorusu da önem kazanmaktadır.

Bu sorunun merkezinde iz etkisi bulunmaktadır. Rüzgâr bir türbinin rotorundan geçerken enerjisinin bir bölümünü bırakır ve türbinin arkasında hızı düşmüş, çalkantısı (türbülansı) artmış bir hava akımı yani bir "iz" oluşur. Bu izin içinde kalan arkadaki türbinler hem daha az enerji üretir hem de daha düzensiz rüzgâra maruz kaldıkları için kule, kanat ve aktarma organlarında daha büyük dalgalı yükler taşır. Dalgalı yükler zamanla malzemede yorulma hasarı biriktirir. Bu nedenle santralin yerleşimine ilişkin kararlar yani türbinler arasındaki mesafe, türbin sıralarının rüzgâra göre açısı ve kule yüksekliği aynı anda iki sonucu belirler: yıllık enerji üretimi ve türbinlerin yapısal ömrü. Örneğin kuleyi yükseltmek daha güçlü rüzgâra erişim sağlar ancak kule tabanındaki eğilme momentlerini büyütür. Bu ilişkiler birinde elde edilen kazancın diğerinde kayba yol açabildiği bir ödünleşim (*trade-off*) yapısı oluşturur.

Çatışan amaçların birlikte ele alınması, çok amaçlı optimizasyonun belirsizlik altında güvenilir tasarım yapılması, gürbüz tasarım ve deney tasarımının çok sayıda uygun seçenek arasından birinin gerekçeli biçimde seçilmesi ise çok kriterli karar vermenin konusudur. Rüzgâr santrali tasarımı bu yöntemlerin yüksek yatırım değerine sahip gerçek bir sistem üzerinde bir araya geldiği uygulama alanlarından biridir.

Bu çalışmada rüzgâr santrallerinde verimlilik ile yapısal ömür arasındaki ödünleşimi doğrudan ya da dolaylı olarak ele alan ulusal ve uluslararası çalışmalar yöntemlerin dayandığı yedi temel kaynakla birlikte incelenmektedir. Önce ödünleşimin fiziksel ve yöntemsel temeli kavramsal bir çerçeve içinde özetlenmektedir. Ardından literatürdeki çalışmalar beş tema altında ele alınmaktadır: türbin ölçeğindeki aerodinamik, yapısal ve kontrol çalışmaları, iz etkisinin modellenmesi ve santral yerleşimi, NSGA-II başta olmak üzere çok amaçlı optimizasyon uygulamaları, deney tasarımı ve çok kriterli karar verme, işletme, tahmin ve sistem entegrasyonu çalışmaları. Çalışmaların karşılaştırmalı değerlendirmesiyle ortaya çıkan araştırma boşlukları ve gelecek çalışmalar için bütünleşik bir çerçeve önerisi de tartışılmıştır. İncelenen çalışmaların yayın yılına ve temaya göre dağılımı Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. İncelenen çalışmaların yayın dönemine ve temaya göre dağılımı (yöntemsel temel kaynaklar hariç, parantez içinde temadaki çalışma sayısı)

Alana olan ilginin son yıllarda belirgin biçimde arttığı gözlenmektedir. İncelenen 65 çalışmanın 51'i 2022 ve sonrasında yayımlanmıştır. Erken dönem çalışmalar iz modellemesi ve yerleşime yoğunlaşırken son dönemde türbin ölçeğindeki tasarım ile işletme, tahmin ve depolama konuları öne çıkmakta deney tasarımı ve çok kriterli karar verme ise en az çalışılan tema olarak kalmaktadır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Farklı disiplinlerden gelen çalışmaların ortak bir dil üzerinden karşılaştırılabilmesi için önce bu bölümde sıkça kullanılan kavramların tanımlanması yararlı olacaktır. Tablo 1 ödünleşimin iki tarafını oluşturan enerji ve yorulma göstergelerini, iz modellemesinin temel parametresini ve çok amaçlı karar sürecinin araçlarını özetlemektedir.

Tablo 1
Bölümde kullanılan temel kavramlar ve göstergeler

Kavram	**Tanım ve kullanım amacı**
Yıllık enerji üretimi (AEP)	Bir türbinin ya da santralin bir yılda ürettiği enerji (MWh/yıl). Rüzgâr hızı olasılık dağılımı ile türbinin güç eğrisinin birlikte değerlendirilmesiyle hesaplanır, verimlilik amacının en yaygın göstergesidir.
İz etkisi ve iz kaybı	Türbin arkasında rüzgâr hızının azalması ve türbülansın artması. İz kaybı, iz etkisi nedeniyle üretilemeyen enerjinin izsiz üretime oranıdır.

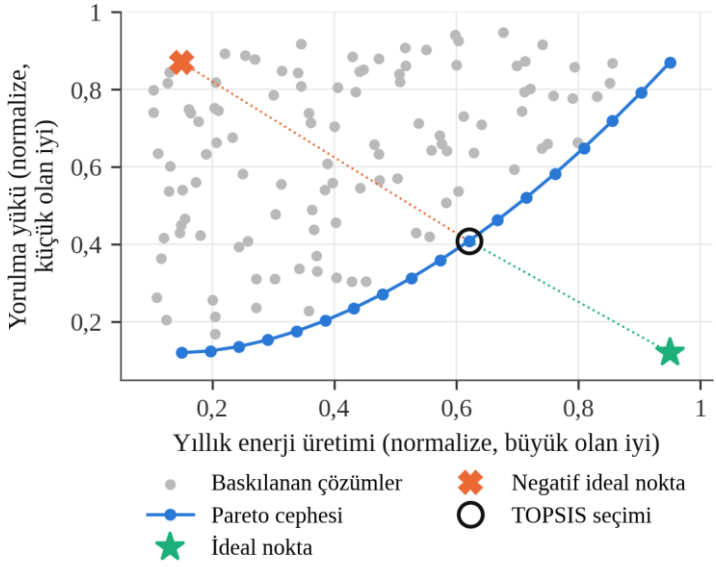
Kavram	Tanım ve kullanım amacı
İz azalım katsayısı (k_w)	Analitik iz modellerinde izin mesafeyle ne kadar hızlı genişlediğini belirleyen parametre. Düşük değer, izin daha uzun mesafe boyunca sürdüğü anlamına gelir.
Türbülans yoğunluğu (TI)	Rüzgâr hızı dalgalanmalarının standart sapmasının ortalama hıza oranı. Hem iz toparlanmasını hem de yorulma yüklerini belirler.
Yorulma ve hasar eşdeğer yükü (DEL)	Değişken yükler altında malzemede biriken hasar. DEL, gerçek yük geçmişiyle aynı hasarı üreten sabit genlikli eşdeğer yüktür, tasarımların yorulma açısından karşılaştırılmasında kullanılır.
Pareto optimalliği	Hiçbir amacı kötüleştirmeden diğerinin iyileştirilemediği çözümler kümesi. Amaç uzayındaki görüntüsüne Pareto cephesi denir.
Sinyal/gürültü oranı ve gürültü faktörü	Taguchi yönteminde tasarımın denetlenemeyen etkenlere (gürültü faktörleri) karşı duyarsızlığını ölçen gösterge.
Uzlaşık çözüm	Çok kriterli karar verme yöntemleriyle (örneğin TOPSIS) Pareto kümesinden seçilen, amaçları karar vericinin tercihlerine göre dengeleyen tek çözüm.

İz etkisinin fiziksel temeli Jensen (1983) tarafından önerilen basit iz modeliyle kurulmuştur. Model, momentumun korunumuna dayanarak türbin arkasındaki izin doğrusal olarak genişlediğini ve iz içindeki hızın her noktada aynı olduğunu varsayar. Katić, Højstrup ve Jensen (1986), modeli türbin kümelerinin verimini hesaplayacak biçimde genişletmiştir, bu genişletilmiş biçim, WAsP gibi yaygın ticari yazılımlardaki "Park" modelinin temelini oluşturmaktadır (Peña, Réthoré ve van der Laan, 2016). Modelin yaygınlığı, bir yerleşimin enerji üretimini çok kısa sürede hesaplayarak binlerce yerleşimin denendiği optimizasyon çalışmalarını mümkün kılmasından kaynaklanmaktadır.

İz etkisinin yapısal tarafı ise türbülansla ilişkilidir. Frandsen (2007) rüzgâr türbini kümelerinde türbülansı ve türbülansın yol açtığı yapısal yükleri ele almıştır. Bu yaklaşımda bir türbinin maruz kaldığı etkin türbülans, ortam türbülansı ile öndeki türbinlerin izinden kaynaklanan ek türbülansın birleşimi olarak ifade edilir. Ek türbülans türbinler arasındaki mesafe azaldıkça büyüdüğünden türbinleri sıkıştırmak enerji kaybını ve yorulma yükünü birlikte artırır. Kule yüksekliğini artırmak ise enerjiyi artırırken yükleri de büyütür. Ödünleşimin asıl kaynağı bu ikinci tür kararlardır.

Ödünleşimi sayısal olarak ele almanın yolu iki amacı birlikte eniyileyen ve bir çözüm kümesi üreten çok amaçlı optimizasyondur. Şekil 2 bu yaklaşımın temel

mantığını şematik olarak göstermektedir. Gri noktalar başka bir çözüme göre hem daha az enerji üreten hem de daha fazla yorulma yükü taşıyan yani baskılanan tasarımları temsil etmektedir. Mavi eğri üzerindeki çözümler ise Pareto cephesini oluşturur, cephe boyunca enerjide kazanılan her birim yorulmada bir miktar kayıpla ödenir. Bu çözümlerden birinin seçilmesi karar vericinin tercihlerini içeren ayrı bir adım gerektirir.



Şekil 2. Enerji ile yorulma arasındaki ödünleşimin şematik gösterimi: baskılanan çözümler, Pareto cephesi ve TOPSIS ile uzlaşık çözümün seçimi

3. TÜRBİN ÖLÇEĞİNDE AERODİNAMİK, YAPISAL VE KONTROL ÇALIŞMALARI

Santral ölçeğindeki ödünleşimin kökeni tek bir türbinin rüzgârdan nasıl güç aldığında ve bu sırada hangi yüklere maruz kaldığında yatmaktadır. Türbin ölçeğindeki çalışmalar genellikle iki soruya odaklanır: kanat geometrisi rüzgârdan elde edilen gücü nasıl etkiler ve bu güç elde edilirken yapı ne kadar zorlanır? Bu iki soru arasındaki gerilim, santral ölçeğinde karşılaşılan enerji–yorulma çatışmasının küçük ölçekli bir yansımasıdır.

3.1. Kanat Geometrisi ve Aerodinamik Verim

Kanat profili, rüzgârın kanat üzerinde oluşturduğu kaldırma ve sürükleme kuvvetlerini belirleyerek türbinin güç katsayısını yani rüzgârdaki enerjinin ne kadarının mekanik güce dönüştürülebildiğini belirler. Sezer (2025) 3 kW gücündeki yatay eksenli bir türbin için dokuz farklı beş basamaklı NACA kanat profilini aynı akış koşullarında karşılaştırmış, 0°–20° hücum açısı aralığında

yürütülen Q-Blade benzetimlerinde NACA 22112 profilinin en yüksek aerodinamik verimi sağladığını belirlemiştir. Firoozi, Hejazi ve Firoozi (2024) son on yılda kanat aerodinamiği üzerine yapılan çalışmaları PRISMA yaklaşımıyla sistematik olarak derleyerek 86 çalışmayı incelemiştir. Derleme özellikle Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD, İngilizce kısaltmasıyla CFD) ile yapay zekânın kanat tasarımına katkısını öne çıkarmaktadır.

Mevcut kanatlar üzerinde yapılan fiziksel değişiklikler de aynı amaca yönelmektedir. Duran (2024) kanat üzerine açılan hava kanallarının aerodinamik verime etkisini deneysel olarak incelemiştir. Kanalsız, 5, 10 ve 15 kanallı dört kanadın jeneratöre bağlanarak sınandığı deneylerde kanal sayısı ve açısal hızın dört düzeyde ele alındığı Taguchi tasarımıyla en yüksek güç katsayısı kanalsız kanata göre yaklaşık %1'lik bir iyileşme sağlamıştır. Çalışmanın dikkat çekici bulgusu en yüksek verimin daha düşük dönme hızında elde edilmesidir. Yazar bunun gürültü ve titreşim sorunlarını azaltabileceğini belirtmiştir.

Doğadan esinlenen tasarımlar ise daha büyük kazançlar vaat etmektedir. Çalışkan (2023) akçaağaç tohumundan esinlenen özgün biyomimetik kanat modelleri geliştirmiştir. Başlangıç modeli ortalama bir akçaağaç tohumundan alınan 36 kesit eğrisinin Fourier serileriyle %99,5 doğrulukla temsil edilmesiyle oluşturulmuş kaldırma ve sürükleme katsayıları deneysel ve sayısal HAD analizlerle geniş bir hücum açısı aralığında incelenmiştir. İki aşamalı optimizasyonda önce topografya optimizasyonuyla başlangıç modeline göre değişen hücum açılarında %15–52, ardından Taguchi yöntemiyle yapılan şekil optimizasyonuyla %99–320 arasında performans artışı elde edilmiştir. Çalışma hücum kenarında oluşan girdap yapısının kaldırmayı artırdığını ve akışın kanat yüzeyinden ayrılmasıyla ortaya çıkan ani güç kaybını (*stall*) geciktirdiğini göstermiştir. Taguchi yönteminin bir kanat tasarımı probleminde doğrudan optimizasyon aracı olarak kullanılması bu çalışmayı yöntemsel açıdan da önemli kılmaktadır.

Kanatlı sistemlerin dışında kalan teknolojiler de karşılaştırma için değerli bir referans sunmaktadır. Örneğin Yıldız (2024) akıştaki periyodik girdap kopmasının oluşturduğu titreşimle rezonansa girerek elektrik üreten kanatsız bir aerojeneratör tasarlamıştır.

3.2. Yapısal Yükler ve Enerji–Yük Çatışması

Enerji ile yük arasındaki çatışma tekil kanat tasarımında da açık çok amaçlı bir problem olarak formüle edilmiştir. Shen, Chen, Zhu, Liu ve Du (2015) kanat aerodinamiğini kaldırma yüzeyi yöntemi ve önceden tanımlanmış bir iz modeliyle hesaplayan bir optimizasyon yöntemi geliştirmiştir. Üç boyutlu biçimde bükülmüş kanatlar NSGA-II ile optimize edilmiş, yıllık enerji üretiminin en büyüklenmesi ile itme kuvveti ve kanat kökündeki eğilme momentinin en küçüklenmesi amaçları birlikte ele alınmıştır. NREL Phase VI rotoru üzerindeki

uygulama çok amaçlı yaklaşımın daha verimli tasarımlar sağlayabildiğini göstermiştir.

Yapısal tarafta malzeme davranışı belirleyicidir. Bereket (2025) küçük ölçekli ve NACA 4415 kesitli bir kanadı ele alarak titreşim davranışının malzemeye ve rüzgâr hızına göre nasıl değiştiğini sayısal yöntemlerle incelemiştir. Rüzgâr hızı arttıkça hem rüzgârdaki enerjinin hem de yapıdaki zorlanmanın artması enerji ile yapısal yük arasındaki ilişkinin malzeme düzeyindeki bir yansımasıdır. Büyük ölçekte ise Deng, Wu, Yang ve Chan (2019) 85 m kanat uzunluğuna sahip yeni nesil 10 MW'lık bir türbin için bütünleşik bir tasarım çerçevesi geliştirmiştir. Çerçeve NURBS tabanlı izogeometrik analizi, aerodinamik kuvvetlerin FAST yazılımıyla hesaplanmasını ve Rhino tabanlı Grasshopper ortamında parametrik modellemeyi birleştirmektedir. Kesme ağlı optimum kanat tasarımıyla performansta %20,9 iyileşme elde edilmiştir.

Enerji–yük çatışması işletmede de ortaya çıkmaktadır. Rivas, Malo, Minchala ve Probst (2023) kanat elemanı momentum teorisini ince cidarlı kiriş modeliyle birleştiren ve güç üretimi ile kanat gerilmesini tek birçok amaçlı maliyet fonksiyonunda dengeleyerek kendi kendini optimize eden bir kontrol algoritması geliştirmiştir. Referans alınan temel kontrolcüyle karşılaştırıldığında algoritma kanatlardaki gerilmede %18,1'lik bir azalma sağlamış bunun karşılığında güç üretimi %11,3 gerilemiştir. Doğrusal olmayan model öngörülü kontrol ise gerilmeyi biraz daha fazla azaltmış ancak daha fazla güç kaybı ve yaklaşık 2,7 kat hesaplama süresi gerektirmiştir. Yük azaltımının güç kaybı pahasına elde edilmesi ödünleşimin kontrol düzeyindeki doğrudan bir yansımasıdır. Eskandari, Vatankhah ve Azadi (2023) da değişken hızlı türbinlerde anma hızının altındaki rüzgâr bölgesinde enerji çekimini en büyüklerken iletim miline binen mekanik yükleri azaltmayı amaçlamıştır. Kayan kipli ve geri adımlamalı kontrolü bulanık mantıkla birleştiren denetleyicinin parametreleri çok amaçlı parçacık sürüsü optimizasyonuyla belirlenmiş ve FAST aeroelastik benzeticisinde CART 2 referans türbini üzerinde bozucu etkiler ve ölçüm gürültüsü altında tatmin edici bir performans elde edilmiştir.

Türbin ölçeğindeki çalışmaların ortak sınırlılığı hesaplama yüküdür. Kanat üzerindeki akışı ayrıntılı olarak çözen HAD ve akışkan–yapı etkileşimi analizleri tek bir tasarımın değerlendirilmesi için saatler gerektirebilmektedir. Çiftçi (2025) mini dronlarda kullanılan bir pervanenin itki, verim ve yapısal gerilme amaçlarıyla çok amaçlı optimizasyonunda bu sorunu vekil (*surrogate*) modeller ve NSGA-II ile aşmıştır. Rüzgâr türbini dışında bir uygulama olsa da çalışma ayrıntılı fiziksel modellerle çok amaçlı optimizasyonun hesaplama yükünü azaltan ara modellerle pratik hâle getirilebileceğine iyi bir örnektir.

Son olarak türbinin mekanik gücünün elektriksel güce dönüştürüldüğü zincir de verimin bir bileşenidir. Hasırcı (2024) kalıcı mıknatıslı senkron jeneratör tabanlı bir rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemini tasarlamış, benzetimini yapmış ve

deneysel olarak uygulamıştır. Özdemir (2024) şebekeye bağlı çift beslemeli asenkron jeneratör tabanlı bir türbinde maksimum güç noktası takibi için bir kontrol yapısı tasarlayarak farklı rüzgâr hızlarında benzetimlerle sınamıştır. Küçük (2025) değişken hızlı türbinler için rezonans güç dönüştürücülü bir maksimum güç noktası izleyici geliştirmiş, Alsalihi (2024) ise Irak'ta şebekeden bağımsız çalışan bir rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemini ele almıştır. Tablo 2, bu bölümde incelenen başlıca çalışmaları karşılaştırmalı olarak özetlemektedir.

Tablo 2
Türbin ölçeğindeki başlıca çalışmaların karşılaştırması

Çalışma	**İncelenen sistem**	**Yöntem ve temel bulgu**
Shen vd. (2015)	Yatay eksenli türbin kanadı	Kaldırma yüzeyi yöntemi + NSGA-II, enerji en büyük, itme ve kök momenti en küçük
Deng vd. (2019)	10 MW, 85 m kanat	İzogeometrik analiz + FAST + örüntü arama, performansta %20,9 iyileşme
Çalışkan (2023)	Akçaağaç tohumu esinli kanat	HAD + deney, topografya (%15–52) ve Taguchi şekil optimizasyonu (%99–320)
Rivas vd. (2023)	Kanat gerilmesi ve güç	Kendi kendini optimize eden kontrol, gerilme −%18,1, güç −%11,3
Eskandari vd. (2023)	Değişken hızlı türbin	Bulanık kayan kipli kontrol + çok amaçlı parçacık sürüsü, enerji çekimi ve aktarma organı yükü
Duran (2024)	Hava kanallı kanat	Deney + Taguchi, en yüksek güç katsayısı 0,1508, yaklaşık %1 iyileşme
Yıldız (2024)	Kanatsız aerojeneratör	2B ve 3B HAD, frekans analizi, güç 0,5 Hz altında yoğunlaşıyor
Çiftçi (2025)	Toroidal pervane	HAD + akışkan–yapı etkileşimi + vekil model + NSGA-II, itki, verim, gerilme
Sezer (2025)	3 kW türbin, 9 NACA profili	Q-Blade, en iyi profil NACA 22112

4. RÜZGÂR ÇİFTLİĞİ OPTİMİZASYONU

Türbinler bir araya getirildiğinde türbin ölçeğinde görülmeyen yeni bir etkileşim ortaya çıkar. Her türbin arkasındaki türbinlerin gördüğü rüzgârı değiştirir. Rüzgâr çiftliği yerleşim optimizasyonu problemi (*Wind Farm Location Optimization Problem - WFLOP*) bu etkileşimi hesaba katarak türbinlerin konumlarını belirlemeyi amaçlar. Problemin çözümü üç bileşene dayanmaktadır: İz etkisini yeterli doğrulukla ve kabul edilebilir sürede tahmin eden bir model,

sahadaki rüzgârı gerçekçi biçimde temsil eden bir veri ve bu model üzerinde en iyi yerleşimi arayan bir optimizasyon yöntemi.

4.1. İz Modellerinin Doğruluğu ve İz Azalım Katsayısı

Jensen modelinin doğruluğu büyük ölçüde iz azalım katsayısının doğru seçilmesine bağlıdır. Peña vd. (2016) bu konuda alanın en çok başvurulan çalışmalarından birini gerçekleştirmiştir. Araştırmacılar Hollanda'da, Kuzey Denizi kıyısından yaklaşık 4 km içeride kurulu kara üstü Sexbierum santralinin verilerini kullanmıştır. Santralde 310 kW gücünde, 30,1 m. rotor çaplı ve 35 m. göbek yükseklikli 18 türbin bulunmaktadır. Çalışmada çeşitli mesafelerdeki tek iz ölçümlerinden ve farklı aralıktaki türbinlerin güç oranlarından yararlanılmıştır. Rüzgâr yönü değişkenliğini Gauss dağılımıyla hesaba katan bir son işlemle Jensen tabanlı model, doğrusallaştırılmış HAD modeli Fuga'dan ve RANS tabanlı bir modelden daha iyi uyum sağlamıştır. En önemli bulgu karasal santraller için yaygın olarak kullanılan 0,075 değerinin bu sahayı iyi temsil etmemesi ve %9,5 türbülans yoğunluğu için 0,038 değerinin çok daha iyi sonuç vermesidir. Araştırmacılar ayrıca düz ve homojen arazide yüzey tabakası bağıntılarından iz azalım katsayısının göbek yüksekliğindeki türbülans yoğunluğunun yaklaşık 0,4 katı olduğunu göstermiştir.

Türkiye'deki saha çalışmaları, model seçimi tartışmasına önemli katkılar sunmaktadır. Kaytancı (2016) karmaşık bir arazide kurulu Çatalca Rüzgâr Enerji Santrali'nin ölçüm verileriyle beş tekli iz durumunu sınamıştır. Çalışmada tek başına uygulanan standart Jensen, yeni Jensen, Larsen ve Frandsen modellerinden hiçbiri diğerlerine belirgin üstünlük sağlamamıştır. Standart Jensen ve Larsen modelleri HAD tabanlı WindSim yazılımının desteğiyle uygulandığında ise hata %12,7–14,3 düzeyine yükselmiştir. Yazara göre bu farkın muhtemel kaynağı HAD desteğiyle çalışan modellerde akış yönündeki türbine ulaşan rüzgârın yönünün ölçülen değerlerden belirgin biçimde sapmasıdır. Çam (2022) ise iz etkisinin yanı sıra türbinlerin önündeki akışın yavaşlamasını ifade eden blokaj etkisini de ele almış, yedi iz ve altı blokaj modelini gerçek bir rüzgâr çiftliğinin SCADA verileriyle karşılaştırmıştır. Birleşik iz ve blokaj modeli etkilerin tek başına kullanılmasına göre gerçek verilere daha iyi yakınsamıştır. Bu iki çalışma birbirini tamamlamaktadır: Kaytancı (2016) daha fazla fiziksel ayrıntının her zaman daha doğru sonuç vermediğini gösterirken, Çam (2022) doğru seçilmiş ek fiziksel etkilerin analitik modellerin başarımını artırabileceğini ortaya koymaktadır.

Denizüstü uygulamalarda iz davranışı daha da önem kazanmaktadır. Yüksel (2025) Sığacık Körfezi'nde tasarlanan sanal bir denizüstü santral üzerinde Jensen, Larsen, Ishihara ve Ainslie modellerini karşılaştırmış ve deniz yüzeyinin düşük pürüzlülüğü nedeniyle izlerin karadakine göre daha uzak mesafelere taşındığını göstermiştir. Bu bulgu Peña vd. (2016)'nın iz azalım katsayısının yüzey pürüzlülüğüne ve türbülansa bağlı olduğu sonucuyla uyumludur. İki

çalışma birlikte ele alındığında iz azalım katsayısının sahanın atmosferik koşullarıyla değişen bir belirsizlik kaynağı olarak ele alınması gereken bir büyüklük olduğu anlaşılmaktadır.

4.2. Yerleşim Optimizasyonu ve Karar Değişkenleri

Yerleşim optimizasyonunda ilk tercih türbin konumlarının nasıl temsil edileceğidir. Küyük (2018), türbinlerin mikro ölçekte konumlandırılması için genetik algoritmaya dayanan bir model kurmuş ve modeli İzmir Adnan Menderes bölgesine ait rüzgâr verileriyle çalıştırmıştır. Ülkü (2019) ise denizüstü santral tasarımını türbin konumlandırma ve kablo yerleşimi alt problemleri olarak ele almıştır. Türbin konumlandırma için Jensen iz modeliyle çoklu iz etkisini içeren özgün bir doğrusal olmayan matematiksel programlama modeli geliştirmiş, bu modelde toplam gücün en büyüklenmesi ve birim güç başına maliyetin en küçüklenmesi amaçlanmıştır. Kablo yerleşimi ise kablo tipleri, kapasiteler ve kesişmeme kısıtlarını içeren karma tamsayılı bir modelle çözülmüştür. İki alt problemi tek modelde birleştiren yaklaşımla on iki test durumundan yalnızca üçünün çözülebilmesi problem boyutu büyüdükçe kesin yöntemlerin sınırına ulaşıldığını göstermektedir.

Türbin koordinatlarının tek tek karar değişkeni yapılması arama uzayını türbin sayısıyla birlikte hızla büyütmektedir. Wang, Tan ve Gu (2015) ızgara tabanlı ve kısıtsız koordinat tabanlı iki yerleşim yöntemini, enerji maliyeti amacı ve iki farklı maliyet modeliyle karşılaştırmıştır. Izgara tabanlı yöntemde yaygın olarak kullanılan 10×10 ızgara yerine 20×20 ızgara kullanılması üç rüzgâr senaryosunda uygunluk değerini yaklaşık %9,8, %3,5 ve %1,2 iyileştirmiş daha ince ızgaralar ise sonucu hemen hemen değiştirmemiştir. Kısıtsız koordinat yöntemi ızgara yöntemine göre yalnızca küçük bir iyileşme sağlamış, buna karşın özellikle çok sayıda türbin optimize edildiğinde daha fazla hesaplama maliyeti gerektirmiştir. Başka bir çalışmada Rodrigues, Bauer ve Bosman (2016) denizüstü santral yerleşimini enerji üretimi, yatırım maliyeti ve işletme maliyetleri arasındaki ödünleşimleri görmek amacıyla çok amaçlı bir problem olarak formüle etmiştir. Araştırmacılar beş kısıt işleme tekniği altında MO-GOMEA algoritmasının bir varyantının tüm problem boyutlarında NSGA-II'den daha iyi sonuç verdiğini göstermiştir. Bu iki çalışma karar değişkeni sayısının ve algoritma seçiminin problem boyutuyla birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu bulgular, türbinlerin düzenli bir ızgara üzerine yerleştirildiği ve bu ızgaranın türbinler arası mesafe ile yönelim açısı gibi az sayıda sürekli değişkenle ifade edildiği parametrik yerleşim yaklaşımının problemi daha yönetilebilir kılabileceğini düşündürmektedir ancak bu yaklaşımın çözüm kalitesine etkisi ayrıca sınanmalıdır.

Dikey eksenli türbinlerde yerleşim problemi farklı bir biçim almaktadır. Erkan (2025) düz kanatlı H-Darrieus tipi bir türbinin aerodinamik performansını iki boyutlu HAD analizleriyle ayrıntılı olarak incelemiştir. Üç türbinlik bir dizinin

yerleşimi iki aşamalı bir Taguchi analiziyle optimize edilmiş ve kompakt bir düzen önerilmiştir. Çalışma deney tasarımının evrimsel algoritmalara başvurmadan da yerleşim problemlerinde etkili bir araç olabileceğini göstermektedir.

Yerleşim kararları yatay düzlemle sınırlı değildir. Kütükcü (2022) karmaşık arazide birbirini etkileyen iki karasal santral (30 türbinlik Kayadüzü ve 16 türbinlik Havza) için optimum göbek yüksekliği dağılımını araştırmıştır. Türbinler arasındaki kot farkı nedeniyle izlerin yalnızca kısmen örtüştüğü durumları hesaba katabilmek için FLORIS benzetim aracına "sanal kule yüksekliği" yaklaşımı eklenmiş ve bu değişiklikle hesaplanan yıllık enerji üretimi 2021 yılı SCADA verilerine daha yakın sonuç vermiştir. Çalışmada biri yalnızca santral gücüne, diğeri güç ile yatırım ve işletme maliyetlerinin ağırlıklı toplamına dayanan iki genel değerlendirme kriteri tanımlanmıştır. Çalışma maliyetin amaç fonksiyonuna eklenmesinin göbek yüksekliği kararlarını belirgin biçimde değiştirdiğini göstermektedir.

Ali, Park ve Lee (2024) ise yapısal bütünlüğü açıkça amaçlar arasına alarak bir adım daha ileri gitmiştir. Güney Kore'deki Ouido sahasının yedi yıllık (2017–2023) rüzgâr ve dalga verileriyle çalışan araştırmacılar türbin aralığı, hâkim rüzgâr yönüne göre yerleşim açısı ve göbek yüksekliğini birlikte optimize etmiştir. Yapısal yükler ve enerji üretimi BLADED yazılımıyla hesaplanmış, monopil temel yükleri için vekil modeller kullanılmıştır. Çalışma, enerji üretimi, yapısal yorulma ve maliyetin yerleşim düzeyinde birlikte ele alınabileceğini gösteren en doğrudan örneklerden biridir.

Yerleşime alternatif olarak iz etkileşimini işletme sırasında yönetmeye çalışan yaklaşımlar da bulunmaktadır. Balakrishnan Son ve Hur (2024) Güney Kore'deki 20 türbinlik bir denizüstü santralde türbinlerin rüzgâra göre yönelme açılarını kasıtlı olarak değiştirerek izleri arkadaki türbinlerden uzaklaştıran iz yönlendirme kontrolünü incelemiştir. Yönelme açıları öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon algoritmasıyla FLORIS'in düşük doğruluklu bir sürümü üzerinde belirlenmiş ve yüksek doğruluklu SOWFA benzetimleriyle doğrulanmıştır. Xu vd. (2023) ise kanat açısını kontrol değişkeni olarak ele almış, analitik bir iz modeli ile kanat elemanı momentum teorisini birleştirerek kanat açısı ile santral gücü arasında analitik duyarlılık ilişkileri kurmuştur. Bu ilişkiler optimizasyonu hızlandırmak için kullanılmış ve SimWindFarm benzetimleriyle sınanmıştır. Yerleşim optimizasyonu ile santral düzeyindeki kontrol bu açıdan birbirinin tamamlayıcısıdır. Birincisi santralin ömrü boyunca değişmeyecek kararları belirlerken, ikincisi bu kararların üzerine işletme sırasında esneklik ekler. Tablo 3 iz modellemesi ve yerleşim çalışmalarını yöntem ve amaç açısından özetlemektedir.

Tablo 3
İz modellemesi ve santral yerleşimi çalışmalarının özeti.

Çalışma	Saha ve karar değişkeni	Yöntem ve temel bulgu
Wang vd. (2015)	Sanal saha, ızgara ve serbest koordinat	Jensen + popülasyon tabanlı arama, serbest yerleşimle en fazla %1,5–2 iyileşme
Rodrigues vd. (2016)	Denizüstü, türbin konumları	Çok amaçlı, MO-GOMEA varyantı NSGA-II'den üstün
Peña vd. (2016)	Sexbierum, model doğrulama	Jensen + Gauss son işlem, k_w 0,075 yerine 0,038
Kaytancı (2016)	Çatalca RES, model doğrulama	Analitik modeller %9,1–9,9, HAD destekli %12,7–14,3 hata
Ülkü (2019)	Denizüstü, konum ve kablo	Doğrusal olmayan ve karma tamsayılı programlama, güç ve birim maliyet
Çam (2022)	Gerçek santral, model doğrulama	7 iz + 6 blokaj modeli, birleşik model SCADA'ya daha yakın
Kütükcü (2022)	İki karasal santral, göbek yüksekliği	FLORIS + deney tasarımı + tepki yüzeyi, güç %0,4–0,56 artış
Ali vd. (2024)	Ouido, aralık, açı, göbek yüksekliği	BLADED + vekil model, iz −%25, yorulma −%18, enerji maliyeti −%15
Balakrishnan vd. (2024)	20 türbin, yönelme açısı	Öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon + FLORIS, SOWFA ile doğrulama
Erkan (2025)	3 dikey eksenli türbin, konum	HAD + iki aşamalı Taguchi (L9), kompakt yerleşim

4.3. Rüzgâr Verisinin Temsili

Yerleşim optimizasyonunun sonuçları, sahadaki rüzgârın ne kadar gerçekçi temsil edildiğine doğrudan bağlıdır. Rüzgâr hızının olasılık dağılımı genellikle şekil (k) ve ölçek (c) parametreli Weibull dağılımıyla ifade edilir ancak Weibull dağılımı her sahada en iyi seçenek olmayabilir. Al-Mhairat ve Al-Quraan (2022) Ürdün'deki dokuz sahanın ölçülmüş rüzgâr verilerini Weibull, Rayleigh ve Gamma dağılımlarıyla modellemiş, parametreleri en büyük olabilirlik yönteminin yanı sıra parçacık sürüsü, gri kurt ve balina optimizasyonu algoritmalarıyla tahmin etmiştir. Kök ortalama kare hata ve belirlenme katsayısına göre parçacık sürüsü optimizasyonu tüm sahalarda en iyi tahmin yöntemi olmuş, sahaların çoğunda ise en iyi uyumu Gamma dağılımı sağlamıştır.

Ölçüm döneminin güncelliği de sonuçları etkileyebilmektedir. Bandırma meteoroloji istasyonu bu açıdan öğretici bir örnek sunmaktadır. Korukçu (2017) istasyonda 1975–2005 arasında saatlik olarak alınan ölçümleri analiz etmiştir. A. Aslan (2018) ise Balıkesir'deki on bir istasyonu, bunlar arasında Bandırma'yı, 2011–2015 ölçümleriyle incelemiştir. Ortalama rüzgâr hızı iki dönemde birbirine yakın olsa da şekil parametresi 1,66'dan 1,31'e düşmüştür. Bu durum güncel dönemde dağılımın daha yayvan olduğu yani hem sakin saatlerin hem de kuvvetli rüzgârların daha sık görüldüğü anlamına gelmektedir. Hâkim yön de kuzey-kuzeydoğudan kuzeye kaymıştır. Türbin gücü rüzgâr hızıyla doğrusal olmayan biçimde değiştiği için aynı ortalama hıza sahip iki dağılım farklı enerji üretimlerine yol açabilir. Bu örnek, yerleşim ve fizibilite çalışmalarında kullanılan rüzgâr verisinin ölçüm döneminin açıkça belirtilmesi ve sonuçların mümkünse farklı dönemlere göre sınanması gerektiğini göstermektedir.

Tekno-ekonomik çalışmalar da rüzgâr kaynağının doğru temsiline dayanmaktadır. Satılmış (2024) Ege Denizi'nde Foça açıklarında varsayımsal bir denizüstü santralin teknik ve ekonomik benzetimini 5 MW gücündeki türbinler ve 25 yıllık proje ömrüyle gerçekleştirmiş, 319 milyon dolarlık yatırıma karşılık 465 milyon dolarlık pozitif net bugünkü değer hesaplamıştır. Aydın (2010) ise türbin seçimi ve birim enerji maliyeti için bir optimizasyon yazılımı geliştirmiştir. Bağlı (2026), Türkiye'nin il bazlı saatlik rüzgâr üretim verilerini yedi bölge için Weibull dağılımıyla modellemiş, Doğu ve İç Anadolu'nun daha kararlı, Marmara ve Ege kıyılarının daha dalgalı bir üretim örüntüsüne sahip olduğunu göstermiştir. Kararlı bölgelerde kurulu gücün artırılmasının öngörülebilirliği iyileştirdiği ancak iç bölgelerde iletim altyapısının kısıt oluşturduğu belirtilmiştir.

5. NSGA-II VE ÇOK AMAÇLI OPTİMİZASYON

Çatışan amaçların bulunduğu bir problemde tek bir en iyi çözüm yoktur. Çok amaçlı optimizasyonun hedefi Pareto cephesini olabildiğince eksiksiz ve dengeli biçimde ortaya çıkarmak ve karar vericiye seçenekler arasındaki ödünleşimi açıkça göstermektir. Bu amaç için geliştirilen yöntemler amaçları ağırlıklandırarak tek bir fonksiyona indirgeyen klasik yaklaşımlardan, tüm cepheyi tek bir çalıştırmada arayan evrimsel algoritmalara kadar geniş bir yelpazeye yayılmaktadır.

5.1. NSGA-II Algoritması

Deb, Pratap, Agarwal ve Meyarivan (2002) tarafından geliştirilen NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*), bu amaç için en yaygın kullanılan evrimsel algoritmadır. Algoritma önceki çok amaçlı evrimsel algoritmaların üç zayıflığını gidermek üzere tasarlanmıştır: yüksek hesaplama karmaşıklığı, elitizmin bulunmaması ve bir paylaşım parametresinin belirlenmesi gereği. NSGA-II'de hızlı ve baskın olmayan sıralama çözümleri birbirine üstünlüklerine göre katmanlara ayırarak karmaşıklığı düşürür. Ebeveyn ve yavru popülasyonlarını birleştiren elitist seçim, bulunan en iyi çözümlerin

kaybolmamasını sağlar. Kalabalık mesafesi ise parametre gerektirmeden çözümlerin cephe boyunca dengeli dağılmasını sağlar.

Algoritmanın işleyişini ayrıntılı olarak ele alan Türkçe çalışmalar yöntemin anlaşılması açısından geçerli bir kaynak oluşturmaktadır. Ahmetoğlu (2018) veri madenciliğinde sınıflandırma başarısını artırmak için aynı sınıftaki belgelerin benzerliğini enbüyükleyip farklı sınıftakilerin benzerliğini en küçükleyen iki çelişen amaç tanımlamış ve bu problemi Java ortamında geliştirdiği bir NSGA-II uygulamasıyla çözmüştür. Aras (2024) ise evrimsel sinir ağlarının tasarımını çok amaçlı optimizasyon teknikleriyle otomatikleştirmiş, sınıflandırma doğruluğu ile yanıt süresi arasındaki çelişkiyi NSGA-II temelli bir yaklaşımla ele almıştır. Ayrıca uygulamayı kolaylaştıran açık kaynaklı araçlardan pymoo kütüphanesi (Blank ve Deb, 2020) özelleştirilebilir operatörleri, paralel değerlendirmeyi, görselleştirmeyi ve çok kriterli karar verme araçlarını tek bir Python çerçevesinde sunmaktadır.

5.2. Mühendislik ve Enerji Sistemlerinde Uygulamalar

NSGA-II'nin geleneksel matematiksel yöntemlere göre avantajı problem büyüdükçe belirginleşmektedir. Durmaz (2016) tek sıra tesis düzenleme problemini toplam taşıma mesafesini en küçükleme ve bölümler arası yakınlık skorunu en büyükleme amaçlarıyla ele almıştır. Belirli bir süre sınırıyla çalıştırılan ağırlıklı hedef programlama büyük boyutlu problemlerde en iyi çözüme ulaşamadığı için Pareto optimal eğrisinden uzak sonuçlar vermiş, NSGA-II ise çok daha kısa hesaplama sürelerinde daha fazla sayıda ve daha nitelikli Pareto etkin çözüm sunmuştur.

Enerji sistemlerinde NSGA-II'nin kullanım alanı oldukça geniştir. Jiang ve Wang (2025) ısı borulu reaktör ile süperkritik karbondioksit Brayton çevriminin birleştirildiği megavat ölçekli bir nükleer güç sisteminin PID kontrol parametrelerini iki ve üç amaçlı stratejilerle NSGA-II kullanarak optimize etmiştir. Basamak ve rampa yük değişimlerindeki dinamik benzetimlerde üç amaçlı strateji iki amaçlıya göre üstün bulunmuştur. Trentin, Martinez, dos Santos, Gasparin ve Salviano (2022) küçük ölçekli bir türbininin dört geometrik parametresini optimize etmiştir. HAD analizleri tepki yüzeyi temelli bir modelle birleştirilmiş, Morris yöntemiyle yapılan tarama analizinden sonra kısıtsız optimizasyon, adımsal regresyon ve NSGA-II ile gerçekleştirilmiştir. Türbin başarımına en büyük katkının (yaklaşık %58) kanat açısından geldiği belirlenmiş ve optimize edilmiş tasarımla dönüşüm verimi %40 artırılmıştır.

Çalışmalarda çoğunlukla NSGA-II hesaplama yükünü azaltan bir ara model üzerinde çalıştırılmaktadır. Trentin vd. (2022) tepki yüzeyinden yararlanmıştır. Aghaei vd. (2024) ise nikel esaslı bir alaşım ile dupleks paslanmaz çeliğin lazer kaynağında, deney sonuçlarıyla eğitilen bir destek vektör regresyonu modelini NSGA-II ile birleştirmiştir. Dai vd. (2025) ise dokuma atölyelerindeki esnek çizelgeleme probleminde başlangıç popülasyonunu yapay arı kolonisi

algoritmasıyla oluşturan ve popülasyonu benzetimli tavlama ile filtreleyen geliştirilmiş bir NSGA-II önermiş ve bu yaklaşımın diğer algoritmalardan daha iyi sonuç verdiğini göstermiştir. Bu çalışmalar NSGA-II'nin başarısının amaç fonksiyonunun ne kadar hızlı hesaplanabildiğine ve algoritmanın probleme ne ölçüde uyarlandığına bağlı olduğunu göstermektedir.

Çok amaçlı optimizasyonun tek aracı evrimsel algoritmalar değildir. Hoseinzadeh, Assareh, Riaz, Lee ve Garcia (2023) İran'ın Buşehr kıyısında güneş, rüzgâr ve okyanus ısıl enerjisini birlikte kullanan, organik Rankine çevrimi, rüzgâr türbini, termoelektrik birim ve güneş kolektöründen oluşan bir sistemin termo-ekonomik analizini yapmıştır. Ekserji verimi ile maliyet oranı arasındaki çok amaçlı optimizasyonu tepki yüzeyi yöntemiyle gerçekleştirmişlerdir. Guo vd. (2026) ise gazdan güce dönüşüm ve karbon yakalama birimleri içeren, rüzgâr gücüyle bağlaşık bir bütünleşik enerji sisteminin ekonomi, çevre ve ekserji verimi amaçlarını, uyarlamalı dalgacık paketi ayrıştırması ve geliştirilmiş bir parçacık sürüsü optimizasyonuyla eniyilemiştir. Karşılaştırma senaryolarına göre ekonomik maliyet azalmış, verim ise artmıştır. Bu iki çalışma çok amaçlı enerji sistemi problemlerinde tepki yüzeyi ve parçacık sürüsü gibi alternatif yaklaşımların da başarıyla kullanıldığını ve yöntem seçiminin problemin yapısına göre yapılması gerektiğini göstermektedir.

Algoritmanın başarımının nasıl ölçüleceği de önemli bir yöntemsel sorudur. Evrimsel algoritmalar rastgelelik içerdiğinden aynı problem farklı başlangıç koşullarıyla çözüldüğünde farklı cepheler elde edilebilir. Yaykıran (2025) Sakarya Havzası için geliştirdiği Python ve pymoo tabanlı SUWO karar destek aracında hidroelektrik üretimi, sulama güvenilirliği ve ekolojik sapma amaçlarını NSGA-II ve NSGA-III ile birlikte optimize etmiştir. Algoritmalar çok sayıda başarım göstergesiyle karşılaştırılmıştır. NSGA-II daha geniş Pareto çeşitliliği ve daha yüksek baskın olmayan çözüm üretme oranı sağlarken, NSGA-III daha hızlı yakınsamış ve daha homojen bir dağılım üretmiştir. Tablo 4 bu bölümde incelenen uygulamaları özetlemektedir.

Tablo 4
Çok amaçlı optimizasyon çalışmaları.

Çalışma	Uygulama alanı	Amaçlar	Yöntem
Durmaz (2016)	Tesis düzenleme	Taşıma mesafesi ↓, yakınlık ↑	NSGA-II ve hedef programlama
Ahmetoğlu (2018)	Belge sınıflandırma	Sınıf içi benzerlik ↑, sınıflar arası ↓	NSGA-II
Trentin vd. (2022)	Dikey eksenli türbin	Güç dönüşüm verimi	Tarama analizi + tepki yüzeyi + NSGA-II
Hoseinzadeh vd. (2023)	Hibrit yenilenebilir sistem	Ekserji verimi ↑, maliyet oranı ↓	Tepki yüzeyi yöntemi
Aghaei vd. (2024)	Lazer kaynağı	Kaynak kalitesi göstergeleri	Destek vektör regresyonu + NSGA-II
Aras (2024)	Sinir ağı tasarımı	Doğruluk ↑, yanıt süresi ↓	NSGA-II temelli
Dai vd. (2025)	Dokuma çizelgeleme	Çizelgeleme amaçları	Arı kolonisi + tavlama destekli NSGA-II
Jiang ve Wang (2025)	Nükleer güç sistemi	Dinamik başarım (2 ve 3 amaç)	NSGA-II
Yaykıran (2025)	Su kaynakları	Enerji ↑, sulama ↑, ekolojik sapma ↓	NSGA-II ve NSGA-III (pymoo)
Guo vd. (2026)	Bütünleşik enerji sistemi	Maliyet ↓, emisyon ↓, verim ↑	Geliştirilmiş parçacık sürüsü

6. DENEY TASARIMI VE ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME

Çok amaçlı optimizasyon karar sürecinin yalnızca bir halkasıdır. Optimizasyondan önce hangi değişkenlerin gerçekten önemli olduğunun anlaşılması, optimizasyondan sonra ise elde edilen çok sayıda çözüm arasından birinin seçilmesi gerekir. Bu iki aşamada en sık başvurulan araçlar sırasıyla deney tasarımı ve çok kriterli karar verme yöntemleridir.

6.1. Taguchi Yöntemi ve Deney Tasarımı

Taguchi (1986) tarafından geliştirilen yöntem az sayıda deneyle çok sayıda faktörün etkisini ortogonal diziler yardımıyla ölçmeyi amaçlar. Yöntemin ayırt edici yönü tasarımcının denetleyebildiği kontrol faktörleri ile denetleyemediği

gürültü faktörlerini ayrı ayrı ele alması ve sinyal/gürültü oranı adı verilen bir ölçütle belirsizliğe karşı en az duyarlı yani en gürbüz tasarımı aramasıdır. Sonuçlar genellikle varyans analiziyle değerlendirilerek her faktörün çıktıdaki değişkenliğe katkısı belirlenir. Bu özellik, rüzgâr santrallerinde iz azalım katsayısı ve türbülans yoğunluğu gibi atmosfer koşullarına bağlı ve denetlenemeyen büyüklüklerin tasarım üzerindeki etkisini incelemek için özellikle uygundur.

Rüzgâr enerjisi alanında Taguchi yönteminin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Kanat ölçeğinde Duran (2024) ve Çalışkan (2023), santral ölçeğinde ise Erkan (2025) Taguchi yöntemini doğrudan optimizasyon aracı olarak kullanmıştır. Kütükcü (2022) deney tasarımını tepki yüzeyleriyle birleştirerek hızlı bir ara model kurmuş, Trentin vd. (2022) ise önce tarama analiziyle etkili değişkenleri belirleyip ardından NSGA-II ile optimizasyon yapmıştır. Bu çalışmalar, deney tasarımı ile evrimsel optimizasyonun ardışık araçlar olduğunu göstermektedir. Deney tasarımı sistemin nasıl davrandığını anlamayı ve arama uzayını gerekçelendirmeyi, evrimsel algoritma ise bu uzayda en iyi ödünleşimi bulmayı sağlamaktadır.

6.2. Çok Kriterli Karar Verme ve TOPSIS

NSGA-II gibi algoritmalar çoğunlukla yüzlerce Pareto-optimal çözüm üretir. Uygulamada ise tek bir tasarımın seçilmesi gerekir. Hwang ve Yoon'un (1981) önerdiği TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) her seçeneği tüm amaçlarda en iyi değerleri taşıyan hayali bir ideal çözüme ve en kötü değerleri taşıyan negatif ideal çözüme olan uzaklıklarına göre sıralar ve ideale en yakın, negatif idealden en uzak seçeneği önerir. Yöntemin basitliği ve sonucun sezgisel olarak yorumlanabilmesi, onu Pareto kümelerinden seçim yapmada en sık kullanılan araçlardan biri hâline getirmiştir.

NSGA-II ile TOPSIS'in art arda kullanıldığı iki aşamalı yapı farklı alanlarda başarıyla uygulanmıştır. Örneğin Kocatürk (2024) gen ifade verilerinin analizinde kullanılan ikili kümeleme algoritmalarının parametrelerini NSGA-II kullanarak optimize etmiş, elde edilen çözümleri TOPSIS ile sıralamış ve süreci R-Shiny tabanlı etkileşimli bir araç kutusuyla kullanıcıya sunmuştur. Yapay veri üzerindeki denemelerde TOPSIS ile seçilen çözümlerin referans ikili kümelere en yakın sonuçları verdiği görülmüştür. Wu vd. (2025) ise enerji adalarındaki denizüstü rüzgâr gücü, hidrojen üretimi ve hidrojen depolamasını birleştiren bir sistemin 24 saatlik çizelgelemesini NSGA-II ve TOPSIS ile yapmıştır.

Çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri rüzgâr enerjisinde algoritma, teknoloji ve saha seçimi gibi farklı karar problemlerinde de kullanılmaktadır. Ala, Mahmoudi, Mirjalili, Šimić ve Pamucar (2023) rüzgâr türbininden aktarılan enerjiyi enbüyüklemek için karınca aslanı, balina, parçacık sürüsü ve karga arama algoritmalarını güvenilirlik, geri dönebilirlik ve kırılganlık ölçütleriyle değerlendirmiş ve OPA-VIKOR melez yöntemiyle sıralamıştır. Karınca aslanı

optimizasyonu mutlak optimuma göre %92 ortalama doğrulukla en iyi sonucu vermiştir. Dash, Chakravarty, Giri ve Khargotra (2025) topografik kısıtları olan kırsal bölgeler için karasal, denizüstü, yüzer, dikey eksenli, mikro, hibrit ve depolamalı rüzgâr teknolojilerini teknik, ekonomik, çevresel ve sosyal ölçütlerle PAPRIKA ve TOPSIS yöntemlerini içeren bir çerçevede değerlendirmiştir.

Saha seçimi ÇKKV yöntemlerinin en yaygın uygulama alanlarından biridir. Bimenyimana vd. (2024) Çin'in Fujian Eyaleti'nde açık erişimli veri tabanlarını kullanarak bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi ile coğrafi bilgi sistemlerini birleştirmiş ve dokuz şehirde rüzgâr enerjisine uygun alanları belirlemiştir. Korkmaz (2024) ise Marmara Bölgesi illerini rüzgâr santrali kurulumu açısından karşılaştırmak için regresyon analizlerini Analitik Hiyerarşi Prosesi ile birlikte kullanmış, uzman görüşleriyle ağırlıklandırılan altı ana ve 31 alt kriter üzerinden en uygun ili belirlemiştir. Bu çalışmalarda ortak olarak karşılaşılan sorun ölçüt ağırlıklarının seçimidir. Ağırlıklar uzman görüşüyle, ağırlıklandırma yöntemleriyle ya da eşit olarak belirlenebilir ve seçilen ağırlık önerilen çözümü doğrudan değiştirebilir. Bu nedenle çok kriterli karar verme sonuçlarının ağırlıklardaki değişimlere karşı duyarlılık analiziyle birlikte raporlanması önerilen çözümün ne kadar güvenilir olduğunun anlaşılması açısından önem taşımaktadır.

7. İŞLETME, TAHMİN VE SİSTEM ENTEGRASYONU

Yerleşim kararlarının sonuçları santralin 20–25 yıllık işletme ömrü boyunca değişken rüzgâr koşulları, bakım gereksinimleri ve şebeke kısıtlarıyla birlikte ortaya çıkar, bu nedenle tasarım çalışmalarının işletme literatürüyle birlikte ele alınması gerekir.

7.1. Rüzgâr Gücü Tahmini ve Belirsizlik

Rüzgârın değişken ve rastlantısal yapısı kısa vadeli tahmin yöntemlerinin gelişmesine yol açmıştır. Salihi (2024) uzun kısa süreli bellek (LSTM) modelinin rüzgâr enerjisi tahminindeki başarımını bir vaka çalışmasıyla incelemiştir. Şenkal (2024) rüzgâr hızı tahmininde ikincil ayrıştırma ile dalgacık sinir ağını birleştiren yeni bir hibrit yaklaşım önermiş, Yücesoy (2025) ise ağaç tabanlı ardışık sığ öğrenme yöntemlerini yeni bir uyarlamalı, eğitim tabanlı rekabetçi algoritmayla optimize etmiştir. Liu vd. (2025) tahmini doğrudan işletme kararlarına bağlamış, rüzgâr–hidrojen depolama sistemi için önerdikleri proaktif çizelgeleme stratejisinde rastgele orman, varyasyonel mod ayrıştırması ve çift yönlü LSTM'den oluşan bir tahmin modeli kullanmış ve çıkış doğruluğu, sistem dalgalanması ve ekipman sağlığını birlikte ölçen bileşik bir amaç fonksiyonu tanımlamıştır. Ekipman sağlığının amaç fonksiyonuna bir terim olarak eklenmesi yorulma ve yaşlanma gibi yapısal etkilerin işletme kararlarına nasıl taşınabileceğine bir örnek oluşturmaktadır.

Belirsizliğin sistem düzeyindeki etkileri de Zhao vd. (2024) tarafından incelenmiştir. Yazarlar Avustralya'daki bir santralin gerçek üretim verileriyle yaptıkları çalışmada, rüzgâr gücü içeren birleşik elektrik ve doğal gaz sistemlerinde rüzgâr dalgalanmasının dağıtık optimizasyon algoritmalarının yakınsamasını bozduğunu göstermiş ve ceza parametresini her adımda güncelleyen uyarlamalı bir yöntem önermiştir.

7.2. Bakım ve Güvenilirlik

Yorulma yükünün azaltılmasının pratik karşılığı bakım gereksinimindeki azalmadır. Saleh, Chiachío, Salas ve Kolios (2023) duruma dayalı bakım kararlarını modellemek için Petri ağlarını pekiştirmeli öğrenmeyle birleştiren akıllı Petri ağı yaklaşımını geliştirmiştir. Yöntem, en düşük işletme maliyetiyle %99,4 kullanılabilirliğe ulaşan bakım politikaları üretmiştir. Lützen (2024) denizüstü türbinlerin sürekli sensörle izlenmeyen bileşenleri için büyük veri tabanlı bir kestirimci bakım stratejisi geliştirmiş, altı aylık işletme verisiyle eğitilen LSTM modeliyle 15 günlük tahmin süresinde %98'in üzerinde doğruluk elde etmiştir. Döndüren (2024) ise türbin jeneratörlerindeki hidrolik arızaların yapay sinir ağlarıyla önceden tespit edilmesini incelemiş, iki yıllık SCADA verisiyle kurulan çok katmanlı algılayıcı modeliyle %96,32 tahmin doğruluğuna ulaşmıştır. Aslan (2025) da güneş–rüzgâr hibrit sistemleri için nesnelerin interneti tabanlı izleme sistemleri geliştirmiştir. Bu çalışmalar tasarım aşamasında azaltılan yorulma yükünün işletme aşamasında daha seyrek bakım ve daha yüksek kullanılabilirlik olarak karşılık bulabileceğini göstermektedir.

7.3. Şebeke Entegrasyonu ve Depolama

Santral çıkışındaki dalgalanmaların şebeke üzerindeki etkileri depolama ve kontrol çözümleriyle yönetilmeye çalışılmaktadır. Abdelbadie, Taha, Hasanien, Turky ve Muyeen (2022) kalıcı mıknatıslı senkron jeneratörlü bir rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminde süperiletken manyetik enerji depolama biriminin denetleyici parametrelerini Arşimet optimizasyon algoritmasıyla belirlemiş, yöntemin genetik algoritma ve parçacık sürüsü optimizasyonuna göre dalgalanmaları daha iyi yumuşattığını göstermiştir. Soliman, Talaat ve Attia (2021) ise rüzgâr penetrasyonunun artmasıyla azalan sistem ataletinin frekans dinamiklerine etkisini Mısır şebekesinin gerçek verileriyle doğrulanmış bir model üzerinde incelemiştir. Rüzgâr enerjisi sisteminin yük frekans kontrolüne katkısını sağlayan denetleyicinin kazançları üç algoritmayla ayarlanmış, en iyi sonucu veren denge optimizasyon algoritmasıyla belirlenen kazançların gürbüzlükleri gösterilmiştir.

Depolama sistemlerinin boyutlandırılması ve işletimi de ekonomik optimizasyonun konusudur. Yi vd. (2022) Kuzey Çin'deki 50 MW'lık bir santralin gerçek verileriyle şarj durumuna dayalı dinamik bir kontrol stratejisi altında depolama kapasitesini parçacık sürüsü optimizasyonuyla belirlemiş ve karşılaştırılan senaryolara göre depolama ömrünü %62,89'a varan oranlarda uzatmıştır. Grimaldi, Minuto, Perol, Casagrande ve Lanzini (2025) İtalyan

elektrik piyasasındaki bir santrale batarya eklenmesini karma tamsayılı doğrusal programlamayla incelemiş ve yatırımın cazip hâle gelmesi için batarya maliyetinin 325 €/kWh'nin altına düşmesi gerektiğini göstermiştir. Chen vd. (2024) yenilenebilir enerji sertifikası ve karbon ticaretini dikkate alarak net sıfır emisyonlu bir trijenerasyon sistemini optimize etmiş ve yaklaşık 20 MW rüzgâr kapasitesinin dış kaynaklara bağımlılığı ve yıllık harcamayı azalttığını bulmuştur. Küçük ölçekte ise Li vd. (2022) triboelektrik ve elektromanyetik birimlerin birlikte çalıştığı esnek bir rüzgâr enerjisi hasatçısı geliştirmiştir. Grimaldi vd. (2025) ile Liu vd. (2025) çalışmalarında bileşen yaşlanmasının parasal bir maliyet ya da amaç terimi olarak modellenmesi, rüzgâr türbinlerindeki yapısal yorulmanın da benzer biçimde ekonomik bir çerçeveye taşınabileceğini göstermektedir.

8. KARŞILAŞTIRMALI DEĞERLENDİRME VE ARAŞTIRMA BOŞLUKLARI

İncelenen çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde rüzgâr santrallerinde verimlilik ile yapısal ömür arasındaki ödünleşime ilişkin literatürün farklı eksenlerde geliştiği ancak bu eksenlerin birbiriyle yeterince bütünleştirilmediği görülmektedir. Tablo 5 doğrudan rüzgâr enerjisiyle ilgili başlıca çalışmaları yedi yöntemsel ölçüte göre karşılaştırmaktadır.

Tablo 5
Rüzgâr enerjisi çalışmalarının yöntemsel ölçütlere göre karşılaştırması

Çalışma	Enerji	Yapısal yük	Maliyet	Çok amaçlı	Deney tasarımı	Belirsizlik	Ölçüm doğrulama
Shen vd. (2015)	✓	✓	–	✓	–	–	–
Wang vd. (2015)	✓	–	✓	–	–	–	–
Rodrigues vd. (2016)	✓	–	✓	✓	–	–	–
Peña vd. (2016)	○	–	–	–	–	✓	✓
Kaytancı (2016)	○	–	–	–	–	–	✓
Ülkü (2019)	✓	–	✓	○	–	–	–
Çam (2022)	✓	–	–	–	–	–	✓
Kütükcü (2022)	✓	–	✓	○	✓	–	✓
Trentin vd. (2022)	✓	–	–	○	✓	–	–
Rivas vd. (2023)	✓	✓	–	○	–	✓	–
Xu vd. (2023)	✓	–	–	–	–	–	–

Çalışma	Enerji	Yapısal yük	Maliyet	Çok amaçlı	Deney tasarımı	Belirsizlik	Ölçüm doğrulama
Ali, Park ve Lee (2024)	✓	✓	✓	○	–	–	–
Balakrishnan vd. (2024)	✓	–	–	–	–	–	○
Erkan (2025)	✓	–	–	–	✓	–	–

Not. ✓: çalışmanın amacında ya da yönteminde doğrudan yer alıyor, ○: kısmen ya da dolaylı olarak yer alıyor (örneğin amaçların ağırlıklı toplamla tek fonksiyona indirgenmesi, ölçüm yerine yüksek doğruluklu benzetimle doğrulama), –: yer almıyor.

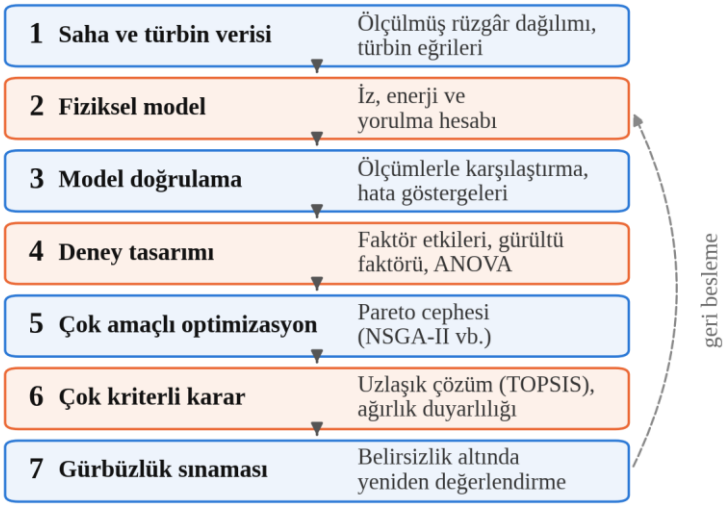
Tablo 5'ten dört genel örüntü çıkarılabilir. Birincisi tablodaki çalışmaların hemen tümünde enerji üretimi amaç olarak yer alırken yapısal yük yalnızca üçünde doğrudan ele alınmıştır. Bunlardan Shen vd. (2015) ve Rivas vd. (2023) tek bir türbinle sınırlıdır, santral yerleşimi düzeyinde yapısal yorulmayı amaçlar arasına alan tek çalışma denizüstü koşullara ve monopil temellere odaklanan Ali vd. (2024) olmuştur. İncelenen çalışmalar arasında karasal santraller için yerleşim kararlarının yorulma yükleri üzerindeki etkisini sistematik olarak inceleyen bir çalışmaya rastlanmamıştır.

İkinci olarak, çok amaçlı yaklaşım yaygın olmakla birlikte birçok çalışmada amaçlar ağırlıklı toplamla tek bir fonksiyona indirgenmektedir (örneğin, Kütükcü, 2022, Rivas vd., 2023). Bu yaklaşım hesaplama açısından avantajlı olsa da karar vericiye amaçlar arasındaki ödünleşimi açıkça göstermemekte ve sonucu ağırlık seçimine bağımlı kılmaktadır. Pareto cephesinin tamamının üretildiği ve ardından çok kriterli karar verme yöntemleriyle bir çözümün gerekçeli biçimde seçildiği iki aşamalı yapı rüzgâr enerjisinde daha çok işletme ve çizelgeleme problemlerinde (Wu vd., 2025) kullanılmış, santral yerleşiminde ise nadiren uygulanmıştır.

Bunun yanında belirsizlik santral yerleşimi çalışmalarında yeterince ele alınmamaktadır. Peña vd. (2016) iz azalım katsayısının atmosfer koşullarına bağlı olduğunu açıkça göstermiş, Yüksel (2025) de izlerin yüzey pürüzlülüğüne göre farklı mesafelere taşındığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte incelenen yerleşim çalışmalarının hiçbiri iz azalım katsayısını bir belirsizlik kaynağı olarak modelleyip önerilen yerleşimin farklı atmosfer koşullarındaki başarımını sınamamıştır. Benzer biçimde Bandırma örneğinde görüldüğü gibi rüzgâr verisinin ölçüm dönemi de sonuçları etkileyebilecek bir belirsizlik kaynağıdır. Deney tasarımının gürültü faktörü kavramı ve Monte Carlo benzetimi gibi olasılıksal yöntemler, bu belirsizliklerin tasarıma sistematik biçimde dâhil edilmesi için uygun araçlar sunmaktadır.

İz modellerinin ölçüm verileriyle doğrulanması (Çam, 2022, Kaytancı, 2016, Peña vd., 2016) ile yerleşim optimizasyonu çoğunlukla birbirinden bağımsız çalışmalarda yürütülmektedir. Kütükcü (2022), FLORIS modelini SCADA verileriyle karşılaştırarak bu iki adımı aynı çalışmada birleştiren az sayıdaki örnekten biridir. Optimizasyonda kullanılan modelin doğruluğu aynı çalışma içinde gösterilmediğinde bulunan optimumun gerçek sahadaki karşılığı belirsiz kalmaktadır.

Bu değerlendirmeler ışığında Şekil 3'teki bütünleşik çerçeve önerilmektedir. Çerçeve incelenen çalışmalarda ayrı ayrı olgunlaşmış yedi adımı tek bir akışta birleştirmektedir. Tasarımda öncelikle enerji ve yorulma aynı fiziksel modelle hesaplanmalı ve model optimizasyondan önce bağımsız ölçümlerle doğrulanmalıdır. Deney tasarımıyla elde edilen faktör ve belirsizlik bilgisi amaç fonksiyonlarının tanımına taşınarak Pareto cephesinden seçilen uzlaşık çözüm belirsizlik altında yeniden sınanmalıdır. Beklenmedik bir duyarlılık ortaya çıkarsa model ya da amaç tanımlarının gözden geçirilmesi önerilmektedir.



Şekil 3. İncelenen literatürden çıkarılan bütünleşik tasarım çerçevesi önerisi.

9. SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Türbin ölçeğindeki çalışmalar enerji ile yapısal yük arasındaki çatışmanın fiziksel kaynağını en açık biçimde ortaya koymakta, kanat tasarımında ve kontrolde gerilmenin azaltılmasının genellikle bir miktar güç kaybıyla ödendiğini göstermektedir. İz modellemesi çalışmaları basit analitik modellerin doğru parametrelerle kullanıldığında karmaşık modellerle rekabet edebildiğini ancak bu parametrelerin, özellikle iz azalım katsayısının sahanın atmosferik koşullarına bağlı olduğunu göstermektedir. Yerleşim çalışmaları ise karar değişkeni sayısının problem boyutunu doğrudan belirlediğini ve maliyet ya da yük gibi ikinci bir

amacın eklenmesinin optimum tasarımı belirgin biçimde değiştirdiğini ortaya koymaktadır. Çok amaçlı optimizasyon literatürü NSGA-II'nin başarısının amaç fonksiyonunun hesaplama maliyetine ve probleme özgü uyarlamalara bağlı olduğunu, işletme ve depolama çalışmaları ise yapısal yaşlanmanın ekonomik bir amaç olarak modellenebileceğini göstermektedir.

Gelecekteki çalışmalar için öncelikli yönler şöyle özetlenebilir. Karasal santrallerde yerleşim kararları enerji üretimi ile yapısal yorulma yükünü de amaç olarak içerecek biçimde ele alınmalıdır. İz azalım katsayısı ve türbülans yoğunluğu gibi atmosfere bağlı parametreler sabit değerler yerine belirsizlik kaynakları olarak modellenmeli ve önerilen tasarımların gürbüzlüğü sınanmalıdır. Optimizasyonda kullanılan modeller aynı çalışma içinde bağımsız ölçümlerle doğrulanmalı, rüzgâr verisinin ölçüm dönemi açıkça belirtilmeli ve sonuçlar mümkünse farklı dönemlere göre karşılaştırılmalıdır. Daha uzun vadede yorulma yükünün ekonomik bir göstergeye dönüştürülmesi ve tasarımın kestirimci bakım ve tahmin yöntemleriyle birleştirilmesi fırsatlar sunmaktadır.

Sonuç olarak rüzgâr santrallerinde verimlilik ile yapısal ömür arasındaki ödünleşim, aerodinamik, yapı mekaniği, meteoroloji ve yöneylem araştırmasının kesişiminde yer alan çok boyutlu bir problemdir. Deney tasarımı, çok amaçlı evrimsel optimizasyon ve çok kriterli karar vermenin ölçüm verileriyle doğrulanmış fiziksel modeller üzerinde bir arada kullanıldığı bütünleşik yaklaşımlar, bu alandaki en önemli araştırma fırsatını oluşturmaktadır.

KAYNAKÇA

Abdelbadie, H. T. K., Taha, A., Hasanien, H. M., Turky, R. A. ve Muyeen, S. M. (2022). Stability enhancement of wind energy conversion systems based on optimal superconducting magnetic energy storage systems using the Archimedes optimization algorithm. *Processes, 10*(2), 366. doi:10.3390/pr10020366

Aghaei, H., Larki, H. A., Taqizadeh, M., Aoudia, M., Aich, W., Kolsi, L. ve Dehkordi, M. H. R. (2024). Multi-objective modeling and optimization of dissimilar laser welding by integrating an artificial intelligence predictive model with NSGA-II algorithm. *Materials Today Communications, 40*, 109765. doi:10.1016/j.mtcomm.2024.109765

Ahmetoğlu, H. (2018). *Belge benzerliği sonuçlarının NSGA-II ile çok amaçlı optimizasyonu* (Yüksek lisans tezi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi'nden erişildi (Tez No. 503872).

Ala, A., Mahmoudi, A., Mirjalili, S., Šimić, V. ve Pamucar, D. (2023). Evaluating the performance of various algorithms for wind energy optimization: A hybrid decision-making model. *Expert Systems with Applications, 221*, 119731. doi:10.1016/j.eswa.2023.119731

Ali, S., Park, H. ve Lee, D. (2024). Multi-criteria optimization of wind turbines in an offshore wind farm with monopile foundation considering structural integrity and energy generation. *Journal of Marine Science and Engineering, 12*(12), 2313. doi:10.3390/jmse12122313

Al-Mhairat, B. ve Al-Quraan, A. (2022). Assessment of wind energy resources in Jordan using different optimization techniques. *Processes, 10*(1), 105. doi:10.3390/pr10010105

Alsalihi, T. (2024). *Stand-alone wind energy conversion system applied as a sustainable technology to produce electrical energy in Iraq* (Yüksek lisans tezi, Bahçeşehir Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi'nden erişildi (Tez No. 883451).

Aras, S. (2024). *Çok amaçlı optimizasyon teknikleriyle dayanıklı otomatik CNN model tasarımı* (Doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi'nden erişildi (Tez No. 907546).

Aslan, A. (2018). Balıkesir rüzgar enerjisi potansiyelinin araştırılması ve türbinlerin ekonomik analiz kapsamında karşılaştırılması. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 38*(1), 25–41.

Aslan, M. B. (2025). *Nesnelerin interneti tabanlı güneş-rüzgâr hibrid enerjisi izleme sistemlerin geliştirilmesi* (Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi'nden erişildi (Tez No. 976142).

Aydın, G. (2010). *Rüzgar enerjisinin optimizasyonu* (Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi'nden erişildi (Tez No. 282700).

Bağlı, C. Ş. (2026). *Türkiye'de kurulu güç dağılımı dengelemesiyle rüzgardan enerji üretiminin üniformlaştırılması* (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi'nden erişildi (Tez No. 990192).

Balakrishnan, R. K., Son, E. ve Hur, S. (2024). Optimization of wind farm power output using wake redirection control. *Renewable Energy, 235*, 121357. doi:10.1016/j.renene.2024.121357

Bereket, F. M. (2025). *NACA 4415 profilli küçük ölçekli rüzgar türbin kanadında farklı malzemelere ve farklı rüzgar hızlarına göre titreşimin sayısal incelenmesi* (Yüksek lisans tezi, Erciyes Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi'nden erişildi (Tez No. 918549).

Bimenyimana, S., Wang, C., Asemota, G. N. O., Uwizerwa, J. M. V., Ihirwe, J. P., Tuyizere, M. N., … Ishimwe, A. M. (2024). Wind energy siting optimization in Fujian Province, China. *Sustainability, 16*(24), 11103. doi:10.3390/su162411103

Blank, J. ve Deb, K. (2020). pymoo: Multi-objective optimization in Python. *IEEE Access, 8*, 89497–89509. doi:10.1109/ACCESS.2020.2990567

Chen, Y., Guo, W., Lund, P. D., Du, N., Yang, K. ve Wang, J. (2024). Configuration optimization of a wind-solar based net-zero emission tri-generation energy system considering renewable power and carbon trading mechanisms. *Renewable Energy, 232*, 121086. doi:10.1016/j.renene.2024.121086

Çalışkan, M. E. (2023). *Rüzgâr enerjisi sistemleri için biyomimetik kanat tasarımı, performans analizi ve optimizasyonu* (Doktora tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi'nden erişildi (Tez No. 796896).

Çam, J. B. (2022). *Coupled wake and blockage modelling for a wind farm* (Yüksek lisans tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü). YÖK Ulusal Tez Merkezi'nden erişildi (Tez No. 771042).

Çiftçi, Ö. (2025). *Multi-objective optimization to increase the performance of a toroidal propeller* (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi'nden erişildi (Tez No. 934343).

Dai, N., Wu, W., Xu, K., Hu, X., Yuan, Y., Peng, L., … Gan, P. (2025). Research on flexible weaving planning based on NSGA-II algorithm. *Journal of Industrial Textiles, 55*, 15280837241302855. doi:10.1177/15280837241302855

Dash, S., Chakravarty, S., Giri, N. C. ve Khargotra, R. (2025). Evaluating sustainable wind energy sources with multiple criteria decision-making (MCDM) techniques. *Computers & Electrical Engineering, 123*, 110285. doi:10.1016/j.compeleceng.2025.110285

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. ve Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6*(2), 182–197. doi:10.1109/4235.996017

Deng, X. W., Wu, N., Yang, K. ve Chan, W. L. (2019). Integrated design framework of next-generation 85-m wind turbine blade: Modelling, aeroelasticity and optimization. *Composites Part B: Engineering, 159*, 53–61. doi:10.1016/j.compositesb.2018.09.028

Döndüren, T. A. (2024). *Yapay sinir ağları yöntemiyle rüzgar türbin generatörlerinde hidrolik arıza tespiti* (Yüksek lisans tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi'nden erişildi (Tez No. 874937).

Duran, A. A. (2024). *Hava kanallı rüzgar türbini kanat tasarımının aerodinamik verime etkisinin deneysel incelenmesi* (Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi'nden erişildi (Tez No. 880051).

Durmaz, E. D. (2016). *Çok amaçlı tek sıra tesis düzenleme probleminin çözümü için NSGA II ve hedef programlama yaklaşımı* (Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi'nden erişildi (Tez No. 417064).

Erkan, O. (2025). *Dikey eksenli rüzgar türbinlerinde sayısal analiz ve rüzgar çiftliği yerleşim optimizasyonu* (Doktora tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi'nden erişildi (Tez No. 929690).

Eskandari, A., Vatankhah, R. ve Azadi, E. (2023). Optimization of wind energy extraction for variable speed wind turbines using fuzzy backstepping sliding mode control based on multi objective PSO. *Ocean Engineering, 285*, 115378. doi:10.1016/j.oceaneng.2023.115378

Firoozi, A. A., Hejazi, F. ve Firoozi, A. A. (2024). Advancing wind energy efficiency: A systematic review of aerodynamic optimization in wind turbine blade design. *Energies, 17*(12), 2919. doi:10.3390/en17122919

Frandsen, S. T. (2007). *Turbulence and turbulence-generated structural loading in wind turbine clusters* (Rapor No. Risø-R-1188(EN)). Roskilde, Danimarka: Risø National Laboratory.

Grimaldi, A., Minuto, F. D., Perol, A., Casagrande, S. ve Lanzini, A. (2025). Techno-economic optimization of utility-scale battery storage integration with a wind farm for wholesale energy arbitrage considering wind curtailment and battery degradation. *Journal of Energy Storage, 112*, 115500. doi:10.1016/j.est.2025.115500

Guo, L., Wang, Y., Teng, Y., Zhang, Y., Li, D., Dong, H. ve Meng, X. (2026). Operation optimization of integrated energy system coupled with wind power and power to gas. *Applied Thermal Engineering, 284*, 129123. doi:10.1016/j.applthermaleng.2025.129123

Hasırcı, H. Y. (2024). *Design, simulation, and experimental implementation of PMSG based wind energy conversion system* (Doktora tezi, Gaziantep Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi'nden erişildi (Tez No. 850509).

Hoseinzadeh, S., Assareh, E., Riaz, A., Lee, M. ve Garcia, D. A. (2023). Ocean thermal energy conversion (OTEC) system driven with solar-wind energy and thermoelectric based on thermo-economic analysis using multi-objective optimization technique. *Energy Reports, 10*, 2982–3000. doi:10.1016/j.egyr.2023.09.131

Hwang, C. L. ve Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: Methods and applications* (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Cilt 186). Berlin: Springer. doi:10.1007/978-3-642-48318-9

Jensen, N. O. (1983). *A note on wind generator interaction* (Rapor No. Risø-M-2411). Roskilde, Danimarka: Risø National Laboratory.

Jiang, Q. ve Wang, P. (2025). NSGA-II algorithm based control parameters optimization strategy for megawatt novel nuclear power systems. *Energy, 316*, 134444. doi:10.1016/j.energy.2025.134444

Katić, I., Højstrup, J. ve Jensen, N. O. (1986). A simple model for cluster efficiency. W. Palz ve E. Sesto (Ed.), *European Wind Energy Association Conference and Exhibition (EWEC'86) bildiriler kitabı* içinde (s. 407–410). Roma: A. Raguzzi.

Kaytancı, T. (2016). *Rüzgar tarlası verisi kullanılarak analitik rüzgar türbin izi modellerinin performansının değerlendirilmesi* (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi'nden erişildi (Tez No. 439528).

Kocatürk, A. (2024). *İkili kümeleme algoritmaları için parametre optimizasyonu: NSGA-II ve TOPSIS yöntemleri ile etkileşimli bir R-Shiny arayüzü* (Doktora tezi, Gazi Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi'nden erişildi (Tez No. 920426).

Korkmaz, E. (2024). *Seçili kriterlerin regresyon ilişkisi ve çok kriterli karar verme ile Marmara Bölgesi rüzgar enerjisi santrali tesis yeri seçimi* (Yüksek lisans tezi, Haliç Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi'nden erişildi (Tez No. 903987).

Korukçu, M. Ö. (2017). Bandırma'nın uzun dönem rüzgar karakteristiğinin ve rüzgar enerjisi potansiyelinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23*(4), 337–342. doi:10.5505/pajes.2016.99267

Küçük, T. V. (2025). *Değişken hızlı rüzgâr türbinleri için rezonans güç dönüştürücülü maksimum güç noktası izleyici geliştirilmesi* (Doktora tezi, Karabük Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi'nden erişildi (Tez No. 959774).

Kütükcü, G. (2022). *Inter farm interactions and hub height optimization for onshore wind farms* (Yüksek lisans tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi'nden erişildi (Tez No. 752262).

Küyük, B. (2018). *Genetik algoritma kullanılarak rüzgar türbinleri için mikro konumlandırma* (Yüksek lisans tezi, Beykent Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi'nden erişildi (Tez No. 911027).

Li, X., Gao, Q., Cao, Y., Yang, Y., Liu, S., Wang, Z. L. ve Cheng, T. (2022). Optimization strategy of wind energy harvesting via triboelectric-electromagnetic flexible cooperation. *Applied Energy, 307*, 118311. doi:10.1016/j.apenergy.2021.118311

Liu, X., Wang, Z., Xu, S., Miao, Y., Xu, J., Liu, S. ve Yu, L. (2025). Performance analysis of wind-hydrogen energy storage system using composite objective optimization proactive scheduling strategy coordinated with wind power prediction. *Energy, 321*, 135416. doi:10.1016/j.energy.2025.135416

Lützen, U. (2024). *Development of operation and maintenance strategies for offshore wind industry based on big data management* (Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi'nden erişildi (Tez No. 888530).

Özdemir, M. (2024). *ÇBAG tabanlı rüzgar türbininde maksimum güç noktası takibi modellemesinin geliştirilmesi* (Yüksek lisans tezi, Düzce Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi'nden erişildi (Tez No. 887705).

Peña, A., Réthoré, P.-E. ve van der Laan, M. P. (2016). On the application of the Jensen wake model using a turbulence-dependent wake decay coefficient: The Sexbierum case. *Wind Energy, 19*(4), 763–776. doi:10.1002/we.1863

Rivas, C. E., Malo, G. D., Minchala, L. I. ve Probst, O. (2023). Self-optimizing control system to maximize power extraction and minimize loads on the blades of a wind turbine. *Machines, 11*(6), 601. doi:10.3390/machines11060601

Rodrigues, S., Bauer, P. ve Bosman, P. A. N. (2016). Multi-objective optimization of wind farm layouts – Complexity, constraint handling and scalability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 65*, 587–609. doi:10.1016/j.rser.2016.07.021

Saleh, A., Chiachío, M., Salas, J. F. ve Kolios, A. (2023). Self-adaptive optimized maintenance of offshore wind turbines by intelligent Petri nets. *Reliability Engineering & System Safety, 231*, 109013. doi:10.1016/j.ress.2022.109013

Salihi, A. A. H. (2024). *Wind energy forecasting methods: A case study of the long short-term memory model (LSTM)* (Yüksek lisans tezi, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi'nden erişildi (Tez No. 847753).

Satılmış, D. (2024). *Offshore wind farm simulation analysis in Turkish Aegean seas, Foça region* (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi'nden erişildi (Tez No. 886222).

Sezer, E. (2025). *Beş basamaklı NACA rüzgâr türbini kanat profillerinin aynı ortam koşullarında karşılaştırmalı aerodinamik performans analizi* (Yüksek lisans tezi, Amasya Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi'nden erişildi (Tez No. 930752).

Shen, X., Chen, J.-G., Zhu, X.-C., Liu, P.-Y. ve Du, Z.-H. (2015). Multi-objective optimization of wind turbine blades using lifting surface method. *Energy, 90*, 1111–1121. doi:10.1016/j.energy.2015.06.062

Soliman, M. H., Talaat, H. E. A. ve Attia, M. A. (2021). Power system frequency control enhancement by optimization of wind energy control system. *Ain Shams Engineering Journal, 12*(4), 3711–3723. doi:10.1016/j.asej.2021.03.027

Şenkal, S. (2024). *Rüzgar hızı tahminlemesinde ikincil ayrıştırmalı ve dalgacık sinir ağı temelli yeni bir hibrit yaklaşım* (Doktora tezi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi'nden erişildi (Tez No. 872126).

Taguchi, G. (1986). *Introduction to quality engineering: Designing quality into products and processes*. Tokyo: Asian Productivity Organization.

Trentin, P. F. S., Martinez, P. H. B. B., dos Santos, G. B., Gasparin, E. E. ve Salviano, L. O. (2022). Screening analysis and unconstrained optimization of a small-scale vertical axis wind turbine. *Energy, 240*, 122782. doi:10.1016/j.energy.2021.122782

Ülkü, İ. (2019). *Offshore wind farm layout optimization using mathematical approaches and heuristic techniques* (Doktora tezi, Marmara Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi'nden erişildi (Tez No. 571195).

Wang, L., Tan, A. C. C. ve Gu, Y. (2015). Comparative study on optimizing the wind farm layout using different design methods and cost models. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 146*, 1–10. doi:10.1016/j.jweia.2015.07.009

Wu, Q., Peng, L., Han, G., Shu, J., Yuan, M. ve Wang, B. (2025). Deep-learning-based scheduling optimization of wind-hydrogen-energy storage system on energy islands. *Energy, 320*, 135107. doi:10.1016/j.energy.2025.135107

Xu, C., Yin, M., Li, Q., Huo, Y., Li, Q. ve Zou, Y. (2023). Wind farm power maximization based on analytical sensitivity model considering wake effect. *Electric Power Systems Research, 224*, 109734. doi:10.1016/j.epsr.2023.109734

Yaykıran, S. (2025). *Optimizasyon tabanlı bir su kaynakları sistemi modelleme aracının geliştirilmesi ve çok amaçlı sektörel tahsise uygulanması* (Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi'nden erişildi (Tez No. 982086).

Yıldız, Ö. B. (2024). *Akış üzerindeki periyodik düzensizlikler tarafından üretilen titreşim ile rezonansa girerek oluşan mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürebilen aerojeneratör tasarımı ve optimizasyonu* (Yüksek lisans tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi'nden erişildi (Tez No. 878934).

Yi, T., Ye, H., Li, Q., Zhang, C., Ren, W. ve Tao, Z. (2022). Energy storage capacity optimization of wind-energy storage hybrid power plant based on dynamic control strategy. *Journal of Energy Storage, 55*, 105372. doi:10.1016/j.est.2022.105372

Yücesoy, E. (2025). *Rüzgar enerjisi üretimi tahmininde ağaç tabanlı ardışık sığ öğrenme yöntemlerinin yeni adaptif eğitim tabanlı rekabetçi algoritma ile optimizasyonu* (Yüksek lisans tezi, Mersin Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi'nden erişildi (Tez No. 992543).

Yüksel, T. (2025). *Denizüstü bir rüzgâr enerjisi santrali geliştirilmesi ve iz etkilerinin kıyaslanması: Örnek uygulama* (Yüksek lisans tezi, Ege Üniversitesi). YÖK Ulusal Tez Merkezi'nden erişildi (Tez No. 974190).

Zhao, B., Qian, T., Li, W., Xin, Y., Zhao, W., Lin, Z., … Pan, T. (2024). Fast distributed co-optimization of electricity and natural gas systems hedging against wind fluctuation and uncertainty. *Energy, 298*, 131420. doi:10.1016/j.energy.2024.131420F

BÖLÜM 10

Nano Partikül Takviyeli Polimer Nanokompozitlerin Aşınma Davranışı: Karşılaştırmalı Bir Değerlendirme

Yılmaz Küçük[1]
İlkay Bardak[2]

[1] Assoc. Prof. Dr., Bartın University, Engineering & Architecture and Design Faculty, Department of Mechanical Engineering, Bartın, Türkiye.
ORCID: 0000-0002-7559-8794
[2] Bartın University, Engineering & Architecture and Design Faculty, Department of Mechanical Engineering, Bartın, Türkiye, ORCID: 0009-0002-5013-6822

1. GİRİŞ

Polimer matrisli kompozitlerin çeşitli mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılması, geleneksel malzemelerle karşılaştırıldığında sahip oldukları üstün özellikler ve artırılmış performans sayesindedir. Polimer kompozitlerin etkililiğini ve verimliliğini ortaya koymak amacıyla birçok araştırma çalışması yürütülmektedir. Polimer kompozitlerde son zamanlardaki ilgi odağı ise aşınma özelliklerinin değerlendirilmesidir. Literatürde, polimer kompozitlerin tribolojik performansı ile ilgili sınırlı sayıda çalışma mevcuttur (Mayana ve ark., 2023). Aşınma ve sürtünme zaman faydalı olabilse de pek çok endüstriyel ve mühendislik uygulamasında istenmeyen sonuçlar doğurmaktadır. Hatta bazı çalışmalarda, farklı amaçlar doğrultusunda aynı anda hem olumlu hem de olumsuz aşınma ve sürtünme etkileri gözlemlenmektedir. Sürtünmenin söz konusu olduğu birçok uygulamada temel amaç, malzeme kaybını en aza indirmektir. Sürtünme ve aşınmadan kaynaklanan malzeme ve enerji kayıplarını azaltmak için alternatif yüzey işlemleri ve yüzey geliştirme teknikleri kullanılmaktadır (Yang ve ark., 2024).

Karbon elyaf takviyeli kompozitler; yüksek mukavemet, hafiflik ve korozyon direncini bir araya getirerek sert çevre koşullarında kullanım için en yaygın malzemeler arasında yer alır. Ancak, bu kompozit malzemelerin darbe dayanımını artırmak hala büyük bir zorluk olmaya devam etmektedir. Kompozit malzemelerin imalatında eklenen elyaflar ile diğer malzemeler arasında güçlü bir bağ sağlama yeteneği nedeniyle polimerler matris elemanı olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Al-Maamari ve ark., 2025). Polimer harmanlamaya ek olarak, polimer nanokompozitlerin geliştirilmesi, polimer matrislerin içerisine nano boyutlu katkı maddelerinin dahil edilmesiyle malzeme tasarım stratejilerinin kapsamını daha da genişletmiştir. Nano dolgu maddeleri, özellikle de metal oksit nanoparçacıkları; yüksek yüzey alanları ve güçlü moleküller arası etkileşimleri sayesinde mekanik mukavemeti ve fonksiyonel özellikleri önemli ölçüde artırmıştır (Kalladi ve ark., 2026). Polimerlerin düşük rijitlik ve düşük mukavemet gibi bariz sınırlamalarıyla başa çıkmak ve farklı sektörlerdeki uygulama alanlarını genişletmek amacıyla; mikro ve nano toz parçacıklar genellikle bileşen fazlarının avantajlarını bir araya getiren polimer kompozitleri işlemek için eklenir. Partikül dolgu maddeleri, polimerlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini birçok yönden değiştirir. Polimer matrislerin içerisine nano tozların ağırlıkça yüzde birkaç (% wt) oranında dâhil edilmesiyle, mekanik özelliklerde olağanüstü gelişmeler elde edilebileceği gösterilmiştir (Fu ve ark., 2008). Bu çalışmada nano toz olarak TiO_2 ve WC tozları kullanılmış ve bu tozların malzemenin aşınma davranışına etkisi incelenmiştir.

Mevcut literatür incelendiğinde, polimer kompozitlerin aşınma direncini artırmaya yönelik birçok çalışma yapıldığı görülmektedir. Özellikle biyobozunur polimerlere yönelik çalışmalar, sürdürülebilirlik hedeflerinin önemli bir parçası olarak değerlendirilmektedir (Meng ve ark., 2020). Bu kapsamda, çeşitli olumsuzlukların (dezavantajların) üstesinden gelmek amacıyla; lifler (fiberler), karbon nanotüpler, grafen, bor karbür ve metalik nanotoz maddeleri gibi takviyeler entegre edilerek PLA kompozitleri geliştirilmiştir Özellikle metalik

dolguların, yüksek sertlik ve rijitlikleri sayesinde yük taşıma kapasitesini artırdığı ve aşınma sırasında yüzey deformasyonunu bastırdığı gösterilmiştir (Gohar ve Rahnejat 2012; Acaroğlu ve ark. 2024; Sürmen ve Güven 2024). Literatürde Polimer matrisli kompozitlerdeki kullanımı sınırlı olsa da önceki çalışmalar ümit verici sonuçlar göstermektedir (Jatti ve ark., 2016).

Bu çalışmasının temel hipotezi, biyobozunur bir polimer olan PLA matrisine TiO_2 ve WC nanopartikülleri eklenerek kompozit malzemenin aşınma direncinin ne ölçüde artırılabileceğinin belirlenmesidir. Nanopartiküllerin eklenmesi, kompozitlerin sadece aşınma dayanımını değil aynı zamanda sertlik, mukavemet ve ısı dayanımı gibi mekanik özelliklerini de geliştirebilmektedir. Bu iyileştirmeler, biyobozunur PLA polimerlerinin daha geniş bir endüstriyel ürün yelpazesinde kullanımını teşvik edebilir. Böylece, çevre dostu özellikleriyle öne çıkan PLA'nın; otomotiv, elektronik, ambalaj ve tıbbi cihazlar gibi sektörlerde kullanılma potansiyelinin artması beklenmektedir. PLA polimer matrisi içerisine çeşitli oranlarda TiO_2 ve WC nanopartikülleri eklenip ve bu katkıların kompozitlerin aşınma davranışları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Nanopartiküller, özellikle polimer matrisin yüzey aşınma direncini artırmada oldukça etkilidir; çünkü nano ölçekteki parçacıklar malzemenin mikroyapısına entegre olarak daha sağlam bir yapı oluşturur. Ayrıca TiO_2'nin UV dayanıklılığı sağlama ve biyouyumluluk özellikleri, PLA matrisli kompozitlerin performansını daha da artırabilir.

Polimer nano kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirmede nanoparçacık ilavesi son yıllarda giderek artan şekilde ilgi görmektedir. Kompozit malzemelerin davranışları üzerine bazı nanoparçacıkların eklenmesini inceleyen birçok araştırmacı bulunmaktadır. Literatürde araştırmacılar (Al-Saadi ve ark., 2024), epoksi kompozite ağırlıkça %0, %5 ve %10 oranlarında tungsten karbür (WC) ilavesini incelemiş ve en iyi darbe mukavemetinin %5 WC yerine %10 WC ilavesiyle elde edildiğini bulmuşlardır. Krishnan ve ark. (2024), epoksi matrislerine ağırlıkça %3 oranında WC nanoparçacıklarının dahil edilmesinin, darbe mukavemetinde %30'luk kayda değer bir iyileşme ile sonuçlandığını ortaya koymuştur. Dolgu maddesi yüklemesi %1'den %3 WC'ye çıkarıldığında darbe özellikleri önemli ölçüde gelişmektedir. Yapılan diğer çalışmalar da nano dolgu maddelerinin kompozitler üzerindeki etkisini, özellikle darbe mukavemetini artırmaya odaklanarak değerlendirmiştir (Al-Zubaydi ve ark., 2021). Bir diğer çalışmadan darbe testi sonuçları, darbe mukavemetinin WC içeriğinin artmasıyla önemli ölçüde yükseldiğini göstermiştir (Athith ve ark., 2018).

Gerçekleştirilen literatür çalışmasında da görüldüğü üzere sürtünme ve aşınma testleri belirli koşullar altında bir malzemenin farklı maddelerle reaksiyonuna ve temasına bağlı olarak tribolojik birçok karakterizasyonun bilinmesini sağlamaktadır. Günlük hayatta PLA ve türevlerinden üretilen malzemeler fiziksel olarak temas halinde çalıştığından, PLA ve türevi hammaddelerinin tribolojik davranışlarının bilinmesi elzemdir. Tribolojik davranışlarının bilinmesiyle kullanılan PLA ve türevi malzemelerin mekanik performasına ve hizmet ömrüne etkisi kaçınılmazdır. Tam da bu noktada PLA ve türevlerinden üretilen çeşitli 3D baskılı parçaların tribolojik özellikleri üzerine

çok sayıda çalışma yürütüldüğü gözlemlenmektedir. Tribolojik davranışların incelenmesi hatta iyileştirilmesi amacıyla PLA ve türevleri içerisine çeşitli nano malzemeler katılarak tribolojik davranışları inceleyen çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Aydın, 2025; Yalçın ve ark., 2026). Sonuç olarak, PLA+TiO_2 ve PLA+WC polimer nanokompozitler, tribolojik uygulamalarda umut vadeden polimer esaslı malzemelere aday olarak değerlendirilebilir. PLA matrisli nanopartikül katkılı polimer kompozitlerin geliştirilmesi, çevre dostu ve biyobozunur malzemelerin endüstriyel uygulamalardaki etkinliğini artırmak açısından önemli bir katkı sunacaktır. Bu çalışma, hem literatüre önemli bir referans sağlayacak hem de çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunarak ekolojik ayak izini azaltma amacına hizmet edecektir. Elde edilen deneysel verilerin, gelecekte polimerlerin daha dayanıklı ve uzun ömürlü ürünlerin üretiminde kullanılabilmesine katkı sağlayabilecek potansiyele sahip olduğu değerlendirilmektedir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Numune hazırlama

Bu çalışmada yaygın olarak kullanılan ve biyouyumlu bir polimer matris malzemesi olan PLA tercih edilmiştir. Katkısız PLA numune ile buna ağırlıkça %1 oranında titanyum dioksit (TiO_2) ve tungsten karbür (WC) nanopartikül takviyesi ile üretilen 2 ek polimer nanokompozitin üretimi gerçekleştirilmiştir. PLA granül ve nanotozlara ait özellikler Tablo 1 de verilmiştir.

Tablo 1. PLA granül ve nano boyutlu tozlara ilişkin özellik tablosu

Malzeme	Toz boyutu (nm)	Saflık (%)	Sertlik (HV)
PLA	Granül		-
TiO_2	20-30	%99,5	1100
WC	30-45	%99,9	1600

Nanokompozit üretimi için hassas terazide belirlenen ağırlık yüzdesine uygun olarak tartılan nano boyutlu tozlar PLA granülleri ile birlikte konulan bir kap içerisinde titreşimli karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Daha sonra polimer ekstrüzyon cihazı haznesine (Şekil 1) 15 g olacak şekilde doldurulduktan sonra 210 °C hazne sıcaklığına ulaştığında 4 mm çapında filament olarak ekstrüze edilerek nano kompozit polimer üretimi gerçekleştirilmiştir.



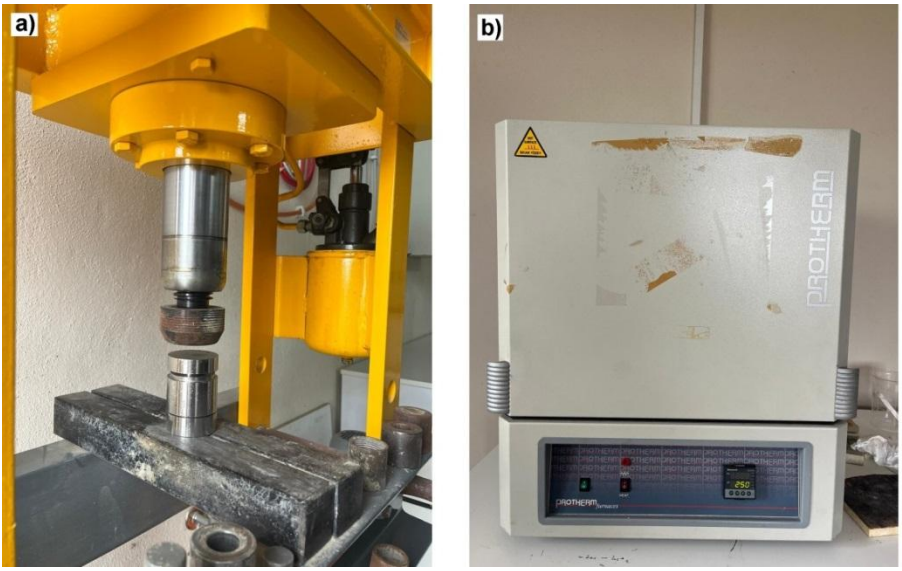
Şekil 1. Polimer ekstrüzyon cihazı

Filament halinde üretilen polimer nanokompozitlerin homojen bir dağılıma sahip olduğu görüldükten sonra granül PLA ölçülerine yakın boyutlarda kırpılarak ekstrüzyona hazır yarı mamül haline getirilmiştir (Şekil 2).



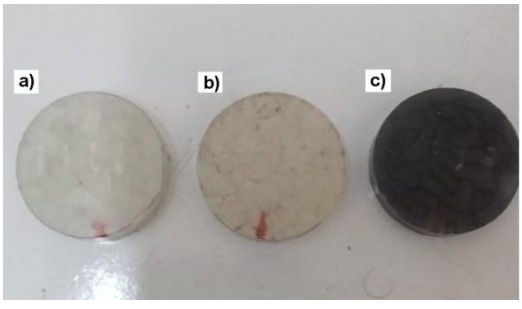
Şekil 2. Üretimi sonrası granüle yakın boyutlarda kırpılmış kompozit filament resimleri

PLA ve nanokompozit granülleri daha sonra 25 mm çapında ve 5 mm derinliğinde ölçülere sahip çift etkili 3 parçalı çelik kalıplar vasıtasıyla önce pres tezgahında 200 bar basıncında soğuk presleme işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 3a). Daha sonra soğuk preslenmiş parçalar fırın (Şekil 3b) içerisinde 250 °C sıcaklıkta 30 dk bekletilerek monolit numuneler haline getirilmiştir.



Şekil 3. Numune üretiminde kullanılan
a) Soğuk presleme tezgâhı ve kalıp b) Sıcaklık ve süre kontrollü fırın

Fırından çıkarılan kalıplar havada soğuma işlemine bırakılıp soğuduktan sonra kalıp içerisinden pres yardımıyla çıkarılmıştır. Üretilen aşınma test numunelerine ait foto Şekil 4'te verilmiştir. Test numuneleri optik mikroskopta incelendiğinde nanopartikül dağılımının homojen olduğu, yapı içerisinde boşluk ve gözeneklerin bulunmadığı görülmüş ve sağlıklı bir değerlendirme için yeterli olduğu kanaatine varılmıştır.



Şekil 4. Üretilen aşınma test numuneleri
a) katkısız PLA b) ağ. % 1 TiO_2 katkılı PLA c) ağ. %1 WC katkılı PLA

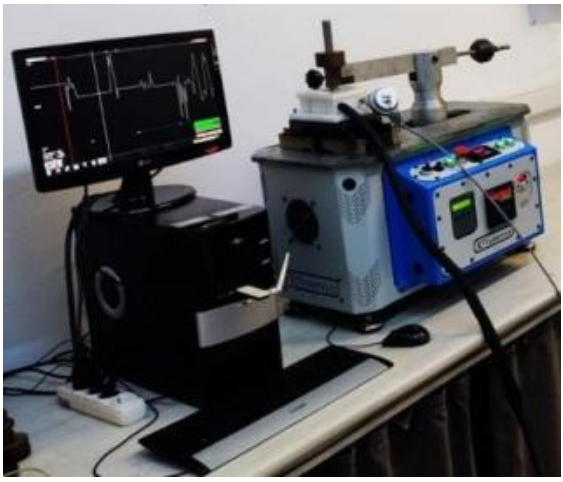
2.2. Aşınma testleri

Aşınma testleri, kontrollü yük, hız ve test süresi koşulları altında test numunelerinin sürtünme temasına maruz bırakıldığı pin-on-flat ileri-geri doğrusal hareket modunda çalışan bir tribometre kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aşınma testi sonrası aşınma hacim kaybı, aşınma oranı ve sürtünme katsayısı değerleri incelenerek kompozitlerin aşınma davranışı değerlendirilmiştir. Aşınma testleri, oda sıcaklığında kuru kayma aşınması olarak yapılmıştır. Aşınma deney parametreleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Aşınma test parametreleri

Malzeme	Aşındırıcı	Yük (N)	Kayma hızı (mm/s)	Test süresi (dk)
PLA PLA+%1 TiO_2 PLA+ %1 WC	AISI 52100, 6 mm çapında çelik bilya	15 30	15 30	10 20

Tablo 2'de verilen aşınma test parametreleri birbirinden bağımsız parametreler olup, toplam kayma mesafesi sabit olacak şekilde yüksek hız için düşük test süresi olacak şekilde uygulanmıştır. Böylece yükün etkisinin yanı sıra farklı kayma hızındaki aşınma davranışı değerlendirilmiştir. Aşınma testleri ileri-geri doğrusal hareket modunda pin-on-flat aşınma esasına göre gerçekleştirilmiştir. Deneyler oda sıcaklığında ve kuru kayma aşınması olarak yapılmıştır. Aşınma test cihazı ve deney sırasında anlık olarak kaydedilen sürtünme kuvveti tespitine ait görüntü Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5- Aşınma test cihazı ve anlık sürtünme kuvveti kaydı

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

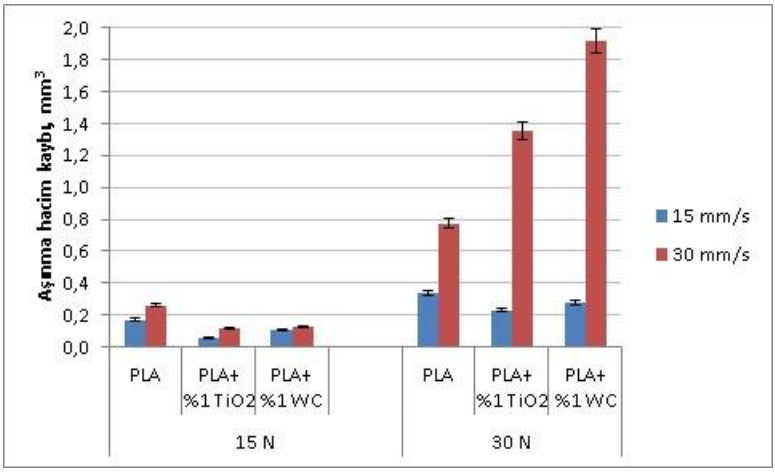
3.1. Aşınma hacim kaybı

Aşınma testlerinden sonra aşınma hacim kaybı değerlerinin tespiti için optik mikroskop kullanılmıştır. İz yüzeyinden alınan görüntü ve ölçümlerden iz genişliği, derinliği ve 2 boyutlu iz profili tespitine ek olarak iz profil alanı değerleri her bir test ve numune için ayrı ayrı elde edilmiştir. İz profil alanının iz boyu ile çarpımı sonucunda hacim kaybı değerleri hesaplanmıştır. Tablo 3'te aşınma hacim kaybı değerleri (mm^3) verilmiştir.

Tablo 3. Aşınma hacim kaybı (mm^3) değerleri

Kayma hızı	15 N			30 N		
	PLA	PLA+TiO_2	PLA+WC	PLA	PLA+TiO_2	PLA+WC
15 mm/s	0,172	0,059	0,102	0,337	0,231	0,278
30 mm/s	0,258	0,114	0,125	0,773	1,357	1,920

İki tekrarlı olarak gerçekleştirilen aşınma deneylerinden elde edilen aşınma hacim kaybı değerlerindeki hata payı hesaplanan değerler üzerinden ±%5 olarak belirlenmiştir. Tablo 3'te verilen değerlere ait grafik gösterimi Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Aşınma hacim kaybı değerleri

Tablo 3 ve Şekil 6 incelendiğinde genel olarak tüm numunelerde ve test şartlarında kayma hızının artmasıyla aşınma hacim kaybının arttığı görülmektedir. Bununla birlikte katkısız PLA numunenin 15 N yük altında ve 15 mm/s kayma hızında meydana gelen aşınma hacim kaybının katkılı numunelerden önemli ölçüde daha yüksek olduğu görülmüştür. Şöyle ki,

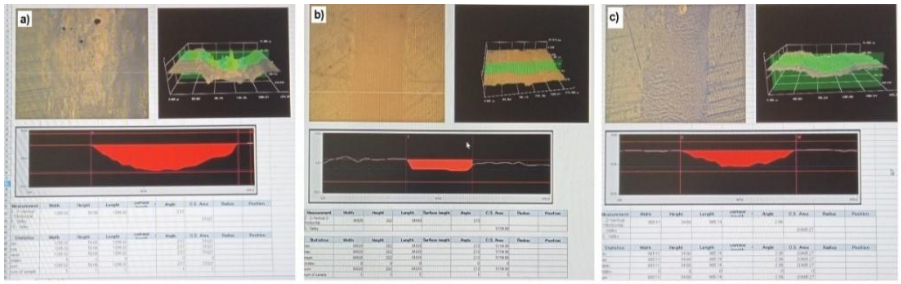
ağırlıkça %1 oranında TiO_2 katkılı numunede katkısıza oranla yaklaşık %190 daha az aşınma meydana gelirken, ağırlıkça %1 oranında WC katkılı numunede katkısıza oranla yaklaşık %68 daha az aşınma gerçekleştiği tespit edilmiştir. TiO_2 katkılı numunede WC katkılı numuneye göre yaklaşık %40 daha az aşınma meydana gelmiş olması ise daha sert olan WC nano partiküllerinin kayma esnasında çevreleyen polimer zincirlerin sürtünme sıcaklık artışının etkisiyle gevşeyerek iz üzerinde transferi sonucu daha fazla iz profil derinliği vermiş olmasına bağlamak mümkündür. Kayma hızının iki katına çıkarılmasıyla katkısız PLA numunesinin aşınma artışı yaklaşık %50 oranında gerçekleşirken bu artış oranı TiO_2 ve WC katkılı numunelerde sırasıyla yaklaşık %93 ve %22 olarak hesaplanmıştır. Buna göre 15 N yük altında kayma hızının en fazla etkisi TiO_2 katkılı numunede görülmüş olup, bunu azalan etki sırasıyla katkısız PLA ve WC katkılı numune izlemiştir. Bu durumu kayma hızının artmasıyla sürtünme kaynaklı anlık sıcaklık artışının etkisiyle polimer yüzeyindeki dayanım azalmasına ve dolayısıyla daha fazla plastik deformasyona bağlı aşınma deformasyonu ile açıklamak mümkündür. Kayma hızının artmasıyla TiO_2 katkılı numunede önemli ölçüde (%93) aşınma deformasyon artışı görülürken WC katkılı numunede ise sadece %22 oranında artış görülmesi, daha sert olan WC nano partiküllerinin tekrarlı basma ve teğetsel kayma gerilmeleri altında zamanla ortaya çıkan dayanım artışına bağlanabilir.

Yükün 30 N'a çıkarılmasıyla tüm numunelerde kayma hızının etkisinin dramatik şekilde artan aşınma deformasyonuna yol açtığı dikkati çekmektedir. Düşük kayma hızında (15 mm/s) artan yüke bağlı olarak artan aşınma miktarları incelendiğinde artışın katkısız PLA da yaklaşık %96, TiO_2 ve WC katkılı numunelerde ise sırasıyla yaklaşık %290 ve %173 olduğu tespit edilmiştir. Buna göre numunelerin genel aşınma davranışlarında dikkat çekici bir değişiklik meydana geldiği anlaşılmaktadır. Düşük kayma hızında (15 mm/s) 30 N yük altında 15 N yükle benzer bir eğilim göstermektedir, diğer bir ifade ile aşınma kaybı değerleri küçükten büyüğe doğru sırasıyla TiO_2, WC katkılı ve katkısız PLA şeklinde gerçekleşmiştir. 30 mm/s kayma hızında ise bu sıralama en az katkısız PLA olmak üzere artan sıralamada TiO_2, WC katkılı numuneler şeklinde meydana gelmiştir. Buradan PLA matrisli ve nanopartikül takviyeli polimer kompozitin aşınma dayanımının kayma hızına önemli ölçüde bağlı olduğu ve artan hızla birlikte aşınma dayanımının dramatik şekilde düştüğü sonucu çıkarılabilir. Bu durumu temas bölgesinde meydana gelen sürtünme kaynaklı ani sıcaklık artışı ile açıklamak mümkündür. Daha yüksek kayma hızı ve daha fazla normal yük altında temas bölgesinde daha fazla normal ve teğetsel kayma gerilmeleri meydana gelmektedir ve bunun sonucunda da sürtünme kaynaklı daha fazla sıcaklık artışı polimer matrisin dayanımını azaltarak daha fazla plastik deformasyon ve aşınma deformasyonu ile sonuçlanmıştır. Artan yük ve kayma hızında katkısız PLA numunede katkılılara oranla en az aşınma artışının

görülmesini nano partiküllerin artan sıcaklık etkisiyle düşen matris bağ kuvvetine bağlı olarak yerinden daha kolay şekilde uzaklaştırılmasına bağlamak mümkündür. Diğer taraftan düşük yükteki WC katkılı numunenin kayma hızına bağlı aşınma artış oranı TiO_2 katkılı numuneye oranla daha az iken, artan yük altında bu durumun tamamen tersi yönde ve daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

3.2. Aşınmış yüzey analizi

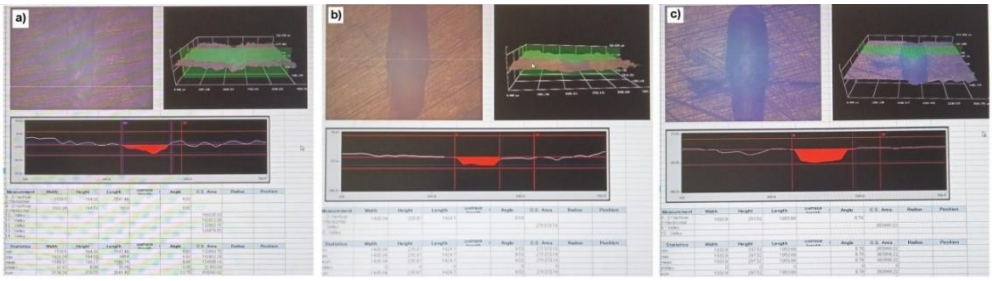
Aşınma testleri sonrasında aşınmış yüzey üzerinden alınan optik mikroskop (OM) görüntüleri üzerinden değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Şekil 7'de 15N yük altında ve 15 mm/s kayma hızında 20 dk boyunca gerçekleştirilen kuru kayma aşınma testleri sonucunda elde edilen aşınmış yüzey görüntüleri verilmiştir.



Şekil 7. 15N yük altında ve 15 mm/s kayma hızında 20 dk boyunca gerçekleştirilen kuru kayma aşınma testleri sonucunda elde edilen aşınmış yüzey görüntüleri
a) katkısız PLA b) ağ.%1 TiO_2 katkılı PLA c) ağ.%1 WC katkılı PLA

Şekil 7 incelendiğinde katkısız PLA numunesinin yüzeyinde oluşan aşınma iz profil derinliği ve genişliği sırasıyla 58 µm ve 1295 µm olarak ölçülmüştür. Bu değerler TiO_2 katkılı numunede sırasıyla 20 µm ve 545 µm iken WC katkılı numunede ise 34 µm ve 965 µm olmuştur. Aşınmaya bağlı yüzey deformasyonunun da iz profili değerlerine uyumlu şekilde gerçekleştiği görülmektedir. Şöyle ki, katkısız PLA numunenin aşınmış yüzeyinde daha fazla iz derinliği ve genişliği elde edilmesinin yanı sıra aşınmış yüzeydeki deformasyonun sürtünme kaynaklı ısı artışının neden olduğu yumuşatma etkisiyle daha düzensiz ve dalgalı bir yüzey meydana geldiği gözlenmiştir. Katkılı numunelerin aşınmış yüzeylerinin ise daha düzgün bir kontura sahip olmakla birlikte, aşınmış yüzeydeki kayma doğrultusunda mikro kanalların TiO_2 katkılı numunede daha belirgin olduğu dikkati çekmektedir. WC katkılı numunede ise aşınmış yüzeyde kayma doğrultusuna dik enine yönde dalgalı bir aşınma hasarı meydana geldiği gözlenmiştir. Bu durumun sert WC partiküllerinin tekrarlı ve ters yönlü basma ve teğetsel kayma gerilmelerine ek olarak sürtünme kaynaklı sıcaklık artışına bağlı yumuşama ortak etkisiyle meydana gelmiş olabileceği değerlendirilmektedir.

Aşınma hacim kaybı değerlerindeki dramatik değişikliklerin meydana geldiği 30 N ve 30 mm/s kayma hızında 10 dk boyunca gerçekleştirilen aşınma testleri sonucunda elde edilen yüzey görüntüleri Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. 30N yük altında ve 30 mm/s kayma hızında 10 dk boyunca gerçekleştirilen kuru kayma aşınma testleri sonucunda elde edilen aşınmış yüzey görüntüleri a) katkısız PLA b) ağ.%1 TiO_2 katkılı PLA c) ağ.%1 WC katkılı PLA

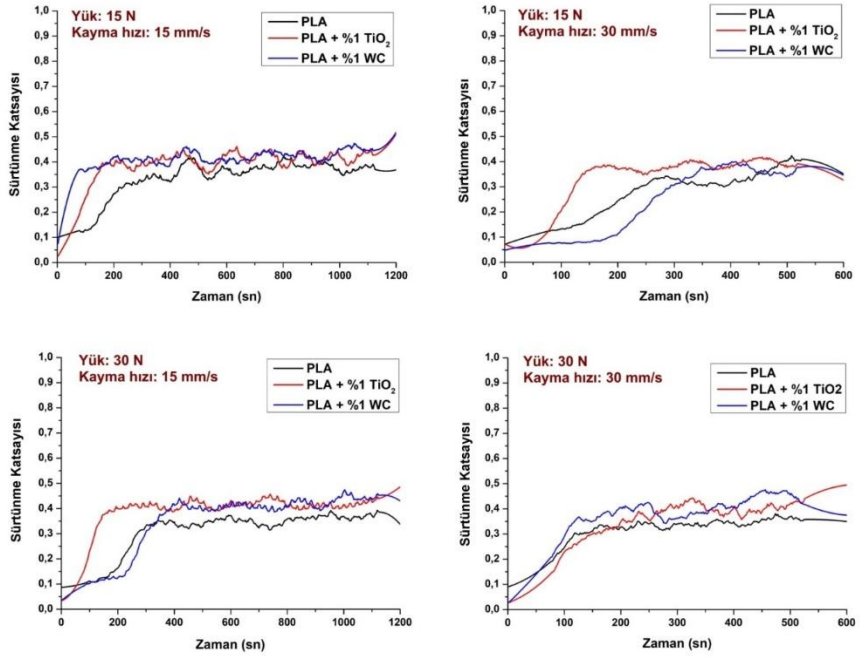
Şekil 8 incelendiğinde katkısız PLA numunesinin yüzeyinde oluşan aşınma iz profil derinliği ve genişliği sırasıyla 184 µm ve 1536 µm olarak ölçülmüştür. Bu değerler TiO_2 katkılı numunede sırasıyla 235 µm ve 1405 µm iken WC katkılı numunede ise 297 µm ve 1930 µm olmuştur. Burada dikkati çeken temel husus katkılı numunelerde özellikle iz derinliğinin önemli ölçüde artmış olmasıdır. Bu durumun artan normal yüke bağlı basma gerilmesi ile teğetsel kayma gerilmelerinin etkisiyle nanopartiküllerin daha derine doğru ilerlemesi ve bu partiküllerin abraziv aşınma ve pulluklama etkisinin neden olmuş olabileceği değerlendirilmektedir. TiO_2 katkılı numune yüzeyinde orta bölgede iz genişlemesi görülürken WC katkılı numunede ise iz genişliğinin uca doğru arttığı dikkati çekmiştir. Bu durumu ise titanyuma göre daha sert olan WC partiküllerinin sürtünme kaynaklı artan ani sıcaklık artışının etkisiyle temas bölgesindeki yumuşama neticesinde WC partiküllerinin pulluklama ve abraziv aşındırıcı etkisinin daha belirgin şekilde gerçekleşmesine ve iz sonuna birikmesiyle açıklamak mümkündür.

3.3. Sürtünme katsayısı değerlendirmesi

Aşınma deneyleri esnasında otomatik olarak kaydedilen teğetsel yük değerlerinden hesaplanan sürtünme katsayısı (SK) grafikleri Şekil 9'da verilmiştir. Şekil 9 incelendiğinde, genel olarak katkılı numunelerin SK değerleri en fazla 0,4 değerine çıkmaktadır. Katkısız PLA numunesinin tüm deneylerde en az (yaklaşık 0,3) SK değeri verdiği dikkati çekmektedir. 15 N yük ve 15 mm/s kayma hızında katkılı polimer kompozit numunelerin ilk 150 sn'de maksimum SK değerine ulaştığı görülürken, katkısız PLA da 300.sn civarında kararlı değerine ulaştığı görülmektedir. TiO2 ve WC katkılı numunelerin SK grafik eğrileri 15 N yük ve 15 mm/s kayma hızında birbirine oldukça yakın ve benzer bir seyir izlemektedir.

15 N yük altında hızın 30 mm/s değerine çıkmasıyla tüm numunelerin ortalama SK değerlerinde önemli bir değişiklik olmamıştır ancak WC katkılı numunenin SK seyri ilk 180 sn boyunca oldukça düşük (yaklaşık 0,05) değerde kalmış ve ardından yükselişe geçerek 350. sn'de kararlı seviye değerlerine ulaştığı görülmüştür. Bu durumun sert WC partiküllerinin temas yüzeyini nokta temasında tutup temas alanını sınırlayarak elastik destek görevi görmesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Zamanla aşınmanın etkisiyle sürtünme yüzeyindeki deformasyona bağlı olarak teğetsel kayma yüklerinin artmasıyla SK değeri de artmıştır.

30 N yük ve 15 mm/s kayma değerinde elde edilen SK grafiklerinin 15 N ve aynı hızdaki eğriler ile oldukça benzer bir seyir izlediği görülmektedir. Tek farklı husus olarak WC katkılı numunenin SK değerinde kararlı seviyeye ulaşması daha geç olmuştur. Hızın 30 mm/s değerine yükselmesiyle tüm numunelerdeki SK seyri birbirine oldukça benzer ilerlediği ve katkılı numunelerin 0,4 değerinde kararlı seyrine karşın katkısız PLA numunenin SK değerinin ise yaklaşık 0,3 olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 9. Farklı yük ve kayma hızlarında elde edilen sürtünme katsayısı grafikleri

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada PLA polimer matrisi içerisine ağırlıkça %1 oranında TiO_2 ve aynı oranda WC katılmak suretiyle katkısız PLA, PLA+ağ.%1 TiO_2 ve PLA+ağ. %1 WC kompozisyonunda üç ayrı numunenin oda sıcaklığında kuru kayma aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Katkı malzemelerinin malzemenin aşınma kaybı ve sürtünme katsayısı değerleri üzerine etkisi incelenerek karşılaştırmalı bir değerlendirme yapılmıştır. Elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir.

- Genel olarak tüm numunelerde yük ve kayma hızının artmasıyla aşınma hacim kaybının arttığı tespit edilmiştir.

- 15 N yük altında ve 15 mm/s kayma hızında ağırlıkça %1 oranında TiO_2 katkılı numunede katkısıza oranla yaklaşık %190 daha az aşınma meydana gelirken, ağırlıkça %1 oranında WC katkılı numunede katkısıza oranla yaklaşık %68 daha az aşınma meydana gelmiştir.

- Kayma hızının iki katına çıkarılmasıyla (30 mm/s) katkısız PLA numunesinin aşınma artışı yaklaşık %50 oranında gerçekleşirken bu artış oranı TiO_2 ve WC katkılı numunelerde sırasıyla yaklaşık %93 ve %22 olarak hesaplanmıştır. Buna göre 15 N yük altında kayma hızının en fazla etkisi TiO_2 katkılı numunede görülmüş olup, bunu azalan etki sırasıyla katkısız PLA ve WC katkılı numune izlemiştir.

- Yükün 30 N'a çıkarılmasıyla tüm numunelerde kayma hızının etkisinin dramatik şekilde artan aşınma deformasyonuna yol açtığı dikkati çekmektedir. Düşük kayma hızında (15 mm/s) artan yüke bağlı olarak artan aşınma miktarları incelendiğinde artışın katkısız PLA da yaklaşık %96, TiO_2 ve WC katkılı numunelerde ise sırasıyla yaklaşık %290 ve %173 olduğu tespit edilmiştir. Buna göre numunelerin genel aşınma davranışlarında dikkat çekici bir değişiklik meydana geldiği anlaşılmaktadır. Düşük kayma hızında (15 mm/s) 30 N yük altında 15 N yükle benzer bir eğilim göstermektedir, diğer bir ifade ile aşınma kaybı değerleri küçükten büyüğe doğru sırasıyla TiO_2, WC katkılı ve katkısız PLA şeklinde gerçekleşmiştir. 30 mm/s kayma hızında ise bu sıralama en az katkısız PLA olmak üzere artan sıralamada TiO_2, WC katkılı numuneler şeklinde meydana gelmiştir. Buradan PLA matrisli ve nanopartikül takviyeli polimer kompozitin aşınma dayanımının kayma hızına önemli ölçüde bağlı olduğu ve artan hızla birlikte aşınma dayanımının dramatik şekilde düştüğü sonucu çıkarılabilir.

- Aşınmaya bağlı yüzey deformasyonuna dair değerlendirme yapıldığında, katkısız PLA numunenin aşınmış yüzeyinde daha fazla iz derinliği ve genişliği elde edilmesinin yanı sıra aşınmış yüzeydeki deformasyonun sürtünme kaynaklı

ısı artışının neden olduğu yumuşatma etkisiyle daha düzensiz ve dalgalı bir yüzey meydana geldiği gözlenmiştir.

- Katkılı numunelerin aşınmış yüzeylerinin ise daha düzgün bir kontura sahip olmakla birlikte, aşınmış yüzeydeki kayma doğrultusunda mikro kanalların TiO_2 katkılı numunede daha belirgin olduğu dikkati çekmektedir. WC katkılı numunede ise aşınmış yüzeyde kayma doğrultusuna dik enine yönde dalgalı bir aşınma hasarı meydana geldiği gözlenmiştir.

- Sürtünme katsayısı verileri incelendiğinde, genel olarak katkılı numunelerin SK değerleri en fazla 0,4 değerine çıkmaktadır. Katkısız PLA numunesinin tüm deneylerde yaklaşık 0,3 SK değerine sahip olduğu görülmüştür.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK 2209 A kapsamında 1919B012407486 no'lu proje ile desteklenmiştir.

KAYNAKÇA

Acaroğlu, M., Öz, Ö., & Öztürk, F. H. (2024). Eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş PLA levhaların bağlantı dayanımları: İndüksiyonla ısıtma ve yapıştırıcı teknolojilerinin karşılaştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(4), 993-1004. https://doi.org/10.35414/akufemubid.1470936

Al Saadi, Z. A. R. A. H., Alobad, Z. K., & Akraa, M. A. (2024). The effect of tungsten carbide nanoparticles on the morphological, mechanical and tribological properties of WC/ epoxy and WC/TBCP/epoxy nanocomposite. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 123. https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.7215

Al-Maamari, M., Al-Ghamdi, A. S., & Al-Otaibi, A. (2025). Enhancing the impact and tribological properties of epoxy/chopped fiber composites using WC and TiO2 nanoparticles for marine journal bearing applications. *Results in Engineering*, 26, Article 104012. https://doi.org/10.101 6/j.rineng.2025 .104012

Al-Zubaydi, A. S. J., Salih, R. M., & Al-Dabbagh, B. M. (2021). Effect of nano TiO2 particles on the properties of carbon fiber-epoxy composites. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, 37, 216–232. https://doi.org/10.1177/1477760620977502

Athith, D., Sanjay, M. R., Yashas Gowda, T. G., Madhu, P., Arpitha, G. R., Yogesha, B., & Omri, M. A. (2018). Effect of tungsten carbide on mechanical and tribological properties of jute/sisal/E-glass fabrics reinforced natural rubber/epoxy composites. *Journal of Industrial Textiles*, 48, 713–737. https://doi.org/10.1177/1528083717740765

Aydın, M. (2025). Eriyik yığma modellemesi (FDM) yöntemi kullanılarak üretilen grafen katkılı PLA+ malzemeden üretilen numunelerin tribolojik davranışlarının incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 13(1), 85-98. https://dergip ark.org.tr/tr/download /article-file/4848773

Fu, S. Y., Feng, X. Q., Lauke, B., & Mai, Y. W. (2008). Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate–polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 39(6), 933–961. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2008.01.002

Gohar, R., & Rahnejat, H. (2012). *Fundamentals of Tribology*. Springer.

Jatti, V. S., Palani, I. A., & Singh, T. P. (2016). Wear performance of tungsten reinforced polymer composites. *Procedia Materials Science*, 10, 353–358. https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.11.039

Kalladi, A. J., Kadavath, J. K., Shaji, S., & Ramesan, M. T. (2026). Sustainable polylactic acid/cashew gum/boehmite nanocomposites: Influence on electrical transport and energy storage. *Synthetic Metals*, 319, Article 118178. https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2026.118178

Krishnan, A. V., Jayakumar, K., Dhananchezian, M., Thirupathy, M., Vadivel, M., Subbiah, T., & Pathinettampadian, G. (2024). Experimental investigation on the impact of tungsten carbide reinforcement on the mechanical properties of sisal-fiber-reinforced composites. *Engineering Proceedings*. https://doi.org/10.3390/engproc.

Mayana, P., Raviprakash, A. V., Mohamed Ali, S., & Mohammed, R. (2023). Erosion wear behavior of polymer-based hybrid composites: A review. *Materials Today: Proceedings*, 77(2), 424–429. https://doi.org/10.1 016/j.matpr.202 2.10.263

Meng, Y., Xu, J., Jin, Z., Prakash, B., & Hu, Y. (2020). A review of recent advances in tribology. *Friction*, 8(2), 221–300. https://doi.org/10.1007/s40544-020-0367-2

Yalçın, M., Aksoy, M., & Kaplan, O. (2026). Tribological performance of additively manufactured tungsten-reinforced PLA composites. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 26(1), 112-124. https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/5206537

Yang, F., Zhao, T., He, P., Zhou, L., Pan, X., Liang, X., Jia, W., An, Z., Liu, P., & Zhang, H. (2024). Effect of pulsed femtosecond laser shock peening surface modification on anti-wear failure properties of AISI 9310 gear steel. *Engineering Failure Analysis*, 159, Article 108146. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108146

BÖLÜM 11

Jet Grout Yöntemi ile Zemin İyileştirme ve Tasarım Optimizasyonu

Metehan Yanık[1]
Mustafa Vekli[2]

[1] İnş. Müh.; Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi,İnşaat Müh. Anabildalı
[2] Doç. Dr.; Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi. İnşaat Müh. Bölümü ORCID No: 0000-0002-5850-731X.

1. GİRİŞ

Depremler sırasında meydana gelen zemin davranışları, yapıların güvenliği ve performansı üzerinde doğrudan etkili olan temel Geoteknik unsurlardan biridir. Özellikle yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu gevşek kumlu ve siltli zeminlerde deprem etkisi altında meydana gelen boşluk suyu basıncı artışı, zeminin efektif gerilmelerinin azalmasına ve sıvılaşma olarak tanımlanan olgunun oluşmasına neden olabilmektedir (Seed & Idriss, 1971; Kramer, 1996). Sıvılaşma sonucunda zemin taşıma gücünde önemli kayıplar meydana gelmekte, aşırı oturmalar, yanal yayılmalar ve temel sistemlerinde ciddi hasarlar oluşabilmektedir (Youd et al. 2001; Idriss & Boulanger, 2008). Geçmişte meydana gelen birçok büyük depremde sıvılaşma kaynaklı zemin problemlerinin önemli ekonomik kayıplara ve yapısal hasarlara yol açtığı rapor edilmiştir. Sıvılaşma riskinin azaltılması amacıyla günümüzde çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri uygulanmaktadır. Taş kolonlar, vibrokompaksiyon, drenaj sistemleri, derin karıştırma (DSM) ve jet grout yöntemleri bu uygulamalar arasında yaygın olarak kullanılan tekniklerdir (Hausmann, 1990; Moseley et al. 2004). Bu yöntemler içerisinde jet grout tekniği, yüksek basınçlı enjeksiyon yardımıyla zemin içerisinde çimento esaslı kolonlar oluşturması sayesinde zeminin dayanımını ve rijitliğini artırmakta, deformasyon özelliklerini iyileştirmekte ve sıvılaşma potansiyelini önemli ölçüde azaltabilmektedir (Croce & Flora, 2000; Bruce, 2003). Özellikle yoğun yapılaşmanın bulunduğu alanlarda ve karmaşık zemin profillerinde uygulanabilir olması nedeniyle son yıllarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Jet grout uygulamalarında kolon çapı, kolon boyu, kolonlar arası mesafe, kolon düzeni ve iyileştirme oranı gibi tasarım parametreleri hem teknik performansı hem de uygulama maliyetini doğrudan etkilemektedir. Geleneksel tasarım yaklaşımlarında bu parametreler çoğunlukla mühendislik deneyimine ve ampirik yaklaşımlara dayalı olarak belirlenmekte olup optimum çözümün elde edilmesi her zaman mümkün olmamaktadır (FHWA, 2015). Bu durum, gelişmiş optimizasyon yöntemlerinin geoteknik tasarım süreçlerine entegre edilmesini gerekli kılmaktadır. Son yıllarda evrimsel algoritmalar, karmaşık mühendislik problemlerinin çözümünde etkin araçlar olarak kullanılmaya başlanmıştır (Deb, 2001). Bunlardan biri olan Diferansiyel Evrim (Differential Evolution-DE) algoritması, sürekli tasarım değişkenlerine sahip problemlerde yüksek performans göstermekte ve optimum çözümlerin elde edilmesine olanak sağlamaktadır (Storn & Price, 1997; Price et al. 2005).

Bu çalışmada, sıvılaşma potansiyeli bulunan zeminlerde uygulanan jet grout yönteminin performansı incelenmiş ve jet grout tasarım parametrelerinin Diferansiyel Evrim algoritması kullanılarak optimize edilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında farklı jet grout kolon geometrileri ve yerleşim düzenleri değerlendirilmiş, sıvılaşma riskini ortadan kaldırırken uygulama maliyetini minimum seviyede tutan optimum tasarım parametrelerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Literatürde jet grout uygulamalarının sıvılaşma riskinin azaltılmasındaki etkinliği üzerine çok sayıda çalışma bulunmasına rağmen, tasarım parametrelerinin Diferansiyel Evrim algoritması kullanılarak optimize edildiği çalışmaların oldukça sınırlı olduğu görülmektedir. Bu yönüyle

çalışmanın, sıvılaşma güvenliğini sağlayan ve aynı zamanda ekonomik açıdan optimum tasarımların belirlenmesine katkı sunacağı düşünülmektedir.

2. ZEMİNLERDE SIVILAŞMA

Zemin sıvılaşması, suya doygun ve gevşek yapılı granüler zeminlerin deprem gibi tekrarlı dinamik yükler altında kayma dayanımlarını önemli ölçüde kaybederek sıvı benzeri davranış göstermesi olarak tanımlanmaktadır. Bu olgu özellikle yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu kumlu ve siltli zeminlerde meydana gelmekte olup, deprem mühendisliği ve geoteknik mühendisliği açısından önemli bir tehlike oluşturmaktadır (Seed & Idriss, 1971; Kramer, 1996). Sismik yükleme sırasında zemin taneleri daha sıkı bir düzene geçme eğilimi göstermesine rağmen yüklemenin kısa sürede gerçekleşmesi nedeniyle drenaj oluşamamakta ve boşluk suyu basıncı artmaktadır. Boşluk suyu basıncındaki bu artış efektif gerilmelerin azalmasına neden olmakta ve belirli koşullar altında zeminin kayma dayanımı büyük ölçüde ortadan kalkabilmektedir (Terzaghi, Peck & Mesri, 1996; Idriss & Boulanger, 2008). Sıvılaşma sonucunda zemin geçici olarak yük taşıma kapasitesini kaybedebilmekte ve bunun sonucunda yapılarda aşırı oturma, farklı oturma, dönme, yanal yayılma ve temel stabilitesi problemleri ortaya çıkabilmektedir. Özellikle liman yapıları, köprü temelleri, dolgu alanları ve kıyı bölgelerinde sıvılaşma kaynaklı hasarlar sıkça gözlemlenmektedir. Tarihsel olarak incelendiğinde, 1964 Niigata Earthquake ve 1964 Alaska Earthquake gibi depremler, sıvılaşmanın mühendislik yapıları üzerindeki yıkıcı etkilerini ortaya koyan önemli örnekler arasında yer almaktadır (Seed, 1979; Kramer, 1996). Bir zeminin sıvılaşmaya karşı duyarlılığı; tane boyu dağılımı, göreli sıkılık, boşluk oranı, ince dane içeriği, zemin yaşı ve yeraltı su seviyesi gibi birçok parametreden etkilenmektedir. Gevşek yapılı ince ve orta kumlar sıvılaşmaya karşı daha hassas davranış gösterirken, yüksek plastisiteli killer ve aşırı konsolide zeminler genellikle sıvılaşmaya karşı daha dirençli davranmaktadır (Youd et al. 2001; Idriss & Boulanger, 2008). Bunun yanında deprem büyüklüğü, maksimum yer ivmesi, deprem süresi ve çevrim sayısı gibi sismik parametreler de sıvılaşma oluşumunda belirleyici rol oynamaktadır (Kramer, 1996). Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde temel yaklaşım, deprem sırasında zeminde oluşan çevrimsel gerilmeler ile zeminin bu gerilmelere karşı gösterebildiği direncin karşılaştırılmasına dayanmaktadır. Bu amaçla geliştirilen yöntemlerde saha ve laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak sıvılaşma güvenlik katsayısı hesaplanmaktadır. Günümüzde Standart Penetrasyon Deneyi (SPT), Konik Penetrasyon Deneyi (CPT) ve kayma dalgası hızı (Vs) tabanlı yöntemler sıvılaşma analizlerinde en yaygın kullanılan yaklaşımlar arasında yer almaktadır (Seed et al. 1985; Youd et al., 2001; Idriss & Boulanger, 2008). Sıvılaşma riski yüksek olarak belirlenen sahalarda yapı güvenliğinin sağlanabilmesi amacıyla çeşitli zemin iyileştirme yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Bu yöntemler genel olarak zeminin sıkılığını artırmak, boşluk suyu basıncı gelişimini sınırlandırmak veya zeminin dayanım ve rijitlik özelliklerini geliştirmek amacıyla uygulanmaktadır. Taş kolonlar, vibrokompaksiyon, derin karıştırma, drenaj sistemleri ve jet grout uygulamaları günümüzde sıvılaşma riskinin azaltılmasında yaygın olarak tercih edilen

yöntemler arasında yer almaktadır (Hausmann, 1990; Moseley et al. 2004; Kirsch & Bell, 2013).

Sonuç olarak zemin sıvılaşması, deprem etkisi altındaki zemin davranışını belirleyen en önemli geoteknik problemlerden biri olarak kabul edilmektedir. Sıvılaşma mekanizmasının doğru anlaşılması, sıvılaşma potansiyelinin güvenilir biçimde değerlendirilmesi ve uygun iyileştirme yöntemlerinin seçilebilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle sıvılaşma analizleri günümüzde deprem bölgelerinde gerçekleştirilen geoteknik tasarım çalışmalarının temel bileşenlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Kramer, 1996; Idriss & Boulanger, 2008).

2.1. ZEMİNLERDE SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bir zeminin sıvılaşmaya karşı göstereceği davranışın belirlenmesi, deprem sırasında zeminde oluşan çevrimsel gerilmeler ile zeminin bu gerilmelere karşı sahip olduğu direncin karşılaştırılmasına dayanmaktadır. Bu amaçla geliştirilen yöntemlerde, deprem yükünün zemin üzerinde oluşturduğu zorlanma düzeyi ile zeminin sıvılaşmaya karşı direnci nicel olarak ifade edilmekte ve elde edilen sonuçlar kullanılarak sıvılaşma potansiyeli değerlendirilmektedir. Günümüzde sıvılaşma analizlerinde yaygın olarak kullanılan yaklaşımlar, saha deneylerinden elde edilen verilerin deprem karakteristikleri ile birlikte değerlendirilmesine dayanmaktadır (Seed & Idriss, 1971; Youd et al., 2001). Deprem sırasında zeminde oluşan dinamik yük etkisi, Tekrarlı Kayma Gerilmesi Oranı (Cyclic Stress Ratio - CSR) ile temsil edilmektedir. CSR değeri, deprem hareketinin büyüklüğüne, maksimum yer ivmesine, zemin derinliğine ve mevcut gerilme koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Bu parametre, deprem sırasında zeminde meydana gelen çevrimsel kayma gerilmelerinin büyüklüğünü ifade etmekte ve sıvılaşmayı tetikleyen yük etkisini temsil etmektedir. Seed ve Idriss (1971) tarafından geliştirilen basitleştirilmiş yöntem günümüzde sıvılaşma analizlerinde en yaygın kullanılan yaklaşımlardan biri olarak kabul edilmektedir.

CSR değeri genel olarak denklem 2.1 yardımıyla hesaplanmaktadır:

$$CSR = 0.65\left(\frac{a_{max}}{g}\right)\left(\frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}}\right)r \qquad (2.1)$$

Burada;

- **amax**: Maksimum yer ivmesi
- **g**: Yerçekimi ivmesi
- **σv0**: Toplam düşey gerilme
- **σ'v0**: Efektif düşey gerilme
- **rd**: Gerilme azaltma katsayısı

Bu eşitlik yardımıyla deprem sırasında zeminde oluşan çevrimsel gerilme seviyesi belirlenebilmekte ve zeminin sıvılaşma açısından maruz kaldığı

zorlanma nicel olarak değerlendirilebilmektedir. (Seed & Idriss, 1971; Idriss & Boulanger, 2008)

Sıvılaşmaya karşı zemin direnci ise Tekrarlı Kayma Direnci Oranı (Cyclic Resistance Ratio - CRR) ile ifade edilmektedir. CRR değeri zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerine bağlı olup genellikle saha deneylerinden elde edilen veriler yardımıyla belirlenmektedir. Özellikle Standart Penetrasyon Deneyi (SPT), Konik Penetrasyon Deneyi (CPT) ve kayma dalgası hızı (Vs) ölçümleri, zeminin sıvılaşmaya karşı göstereceği direncin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir (Youd et al. 2001; Idriss & Boulanger, 2008).

SPT tabanlı yöntemlerde öncelikle arazi deneylerinden elde edilen darbe sayıları enerji, kuyu çapı, tij boyu ve örnekleyici düzeltmeleri uygulanarak normalize edilmektedir. Daha sonra elde edilen düzeltilmiş SPT değerleri kullanılarak zeminin sıvılaşma direnci belirlenmektedir. Özellikle Idriss ve Boulanger (2008) tarafından geliştirilen yöntemler, ince dane içeriği düzeltmelerini de dikkate alarak daha güvenilir sonuçlar vermektedir. Bu nedenle günümüzde birçok geoteknik projede sıvılaşma değerlendirmelerinde bu yöntemler tercih edilmektedir.

Sıvılaşma değerlendirmelerinde en yaygın kullanılan performans göstergelerinden biri sıvılaşma güvenlik katsayısıdır (Factor of Safety, FS). Güvenlik katsayısı, zeminin sıvılaşmaya karşı direncini temsil eden CRR değerinin deprem yükünü temsil eden CSR değerine oranlanmasıyla hesaplanmaktadır:

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \tag{2.2}$$

Bu oran zeminin deprem etkileri altında güvenli davranıp davranmayacağını göstermektedir. Güvenlik katsayısının 1,0'dan büyük olması zeminin mevcut deprem yüküne karşı yeterli dirence sahip olduğunu gösterirken, 1,0'ın altındaki değerler sıvılaşma oluşma ihtimalinin bulunduğunu ifade etmektedir. Uygulamada belirsizliklerin etkisini azaltmak amacıyla çoğu zaman minimum 1.20–1.30 seviyelerinde güvenlik katsayısı hedeflenmektedir (Youd et al. 2001; Idriss & Boulanger, 2008).

Sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi yalnızca güvenlik katsayısının hesaplanmasıyla sınırlı değildir. Zeminin tabakalaşma yapısı, yeraltı su seviyesi, deprem büyüklüğü, deprem süresi, ince dane oranı ve zemin profilinin dinamik özellikleri de değerlendirme sürecinde dikkate alınmaktadır. Bu nedenle modern sıvılaşma analizleri, hem saha deneylerinden elde edilen verilerin hem de deprem karakteristiklerinin birlikte değerlendirildiği kapsamlı bir mühendislik yaklaşımı üzerine kurulmaktadır (Kramer, 1996; Idriss & Boulanger, 2008).

Sıvılaşma riski yüksek olarak belirlenen sahalarda çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri uygulanarak zeminin sıvılaşmaya karşı direncinin artırılması amaçlanmaktadır. Bu uygulamalar sayesinde zemin sıkılığı artırılmakta, boşluk suyu basıncı gelişimi sınırlandırılmakta veya doğrudan zeminin dayanım ve rijitlik özellikleri iyileştirilmektedir. Böylece CRR değeri yükseltilerek güvenlik

katsayısının kabul edilebilir seviyelere çıkarılması hedeflenmektedir (Hausmann, 1990; Moseley et al., 2004).

3. ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Deprem etkisi altında sıvılaşma potansiyeli taşıyan zeminlerde meydana gelen dayanım kayıpları, aşırı oturmalar ve taşıma gücü problemleri, yapı güvenliği açısından önemli riskler oluşturmaktadır. Bu risklerin azaltılması amacıyla çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri geliştirilmiş ve uygulamaya alınmıştır. Zemin iyileştirme yöntemlerinin temel amacı; zeminin dayanımını artırmak, sıkılığını yükseltmek, boşluk suyu basıncı gelişimini sınırlandırmak ve deprem yükleri altında daha güvenli bir davranış sergilemesini sağlamaktır (Hausmann, 1990; Moseley et al. 2004).

Uygulanacak iyileştirme yönteminin seçimi; zemin türü, yeraltı su seviyesi, iyileştirme derinliği, proje gereksinimleri, çevresel etkiler ve ekonomik koşullar gibi birçok parametreye bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle her proje için uygun yöntemin belirlenmesi amacıyla ayrıntılı geoteknik değerlendirmelerin yapılması gerekmektedir (Kirsch & Bell, 2013).

Sıvılaşma riskinin azaltılmasında kullanılan yöntemler genel olarak mekanik iyileştirme yöntemleri, bağlayıcı esaslı iyileştirme yöntemleri ve drenaj temelli iyileştirme yöntemleri olmak üzere üç ana grupta değerlendirilmektedir. Her yöntemin sıvılaşmayı azaltma mekanizması farklı olmakla birlikte temel amaç, zeminin deprem yükleri altındaki performansını iyileştirmektir (Hausmann, 1990; Moseley et al., 2004).

Mekanik iyileştirme yöntemleri, zemin tanelerinin yeniden düzenlenmesini sağlayarak zemin yoğunluğunu artırmayı amaçlamaktadır. Bu yöntemlerde zeminin göreli sıkılığı yükseltilmekte ve deprem sırasında meydana gelebilecek boşluk suyu basıncı artışı azaltılmaktadır. Taş kolon, vibrokompaksiyon ve dinamik kompaksiyon uygulamaları bu grup içerisinde yer alan yaygın yöntemlerdir. Özellikle gevşek ve doygun kumlu zeminlerde başarılı sonuçlar vermelerine rağmen, ince taneli zeminlerde etkinlikleri sınırlı olabilmektedir (Mitchell & Huber, 1985; Priebe, 1995).

Taş kolon yöntemi, zemine yerleştirilen yüksek drenaj kapasitesine sahip granüler kolonlar sayesinde hem zemin sıkılığını artırmakta hem de deprem sırasında oluşan boşluk suyu basıncının daha hızlı dağılmasını sağlamaktadır. Bu nedenle sıvılaşma riski bulunan gevşek kumlu zeminlerde yaygın olarak uygulanmaktadır (Priebe, 1995; Barksdale & Bachus, 1983). Vibrokompaksiyon yöntemi ise titreşim enerjisi kullanılarak zemin tanelerinin yeniden düzenlenmesine ve boşluk oranının azaltılmasına dayanmaktadır. Bu yöntem özellikle temiz kumlarda yüksek başarı sağlamaktadır (Mitchell, 1981).

Bağlayıcı esaslı iyileştirme yöntemleri, zemin içerisine çimento, kireç veya benzeri bağlayıcı malzemelerin ilave edilmesiyle zeminin dayanım ve rijitliğinin artırılması esasına dayanmaktadır. Bu yöntemler sayesinde zemin yapısı güçlendirilmekte ve deprem sırasında meydana gelebilecek deformasyonlar önemli ölçüde azaltılmaktadır. Jet grout, derin karıştırma (Deep Soil Mixing-

DSM) ve çeşitli enjeksiyon yöntemleri bu grup içerisinde değerlendirilmektedir (FHWA, 2015; Bruce, 2003).

Derin karıştırma yöntemi, bağlayıcı malzemelerin mekanik karıştırma ekipmanları yardımıyla zemin içerisine homojen şekilde dağıtılması esasına dayanmaktadır. Bu yöntem sayesinde yüksek dayanımlı zemin-çimento kompozitleri elde edilmekte ve sıvılaşma potansiyeli önemli ölçüde azaltılabilmektedir. Özellikle yumuşak kil ve gevşek kumlu zeminlerde başarılı sonuçlar elde edilmektedir (EuroSoilStab, 2002).

Drenaj temelli iyileştirme yöntemlerinde ise amaç, deprem sırasında oluşan boşluk suyu basıncının kontrollü şekilde tahliye edilmesini sağlamaktır. Bu yöntemlerde zeminin drenaj kapasitesi artırılarak efektif gerilmelerin korunması hedeflenmektedir. Prefabrik düşey drenler, kum drenler ve drenaj kuyuları bu kapsamda değerlendirilmektedir. Özellikle yüksek yeraltı su seviyesine sahip sahalarda sıvılaşma riskinin azaltılmasında etkili sonuçlar vermektedirler (Seed & Booker, 1977; Han, 2015).

Sıvılaşmaya karşı uygulanan iyileştirme yöntemlerinin başarısı, zeminde oluşturdukları temel etki mekanizmasına bağlıdır. Bu mekanizmalar genel olarak zemin yoğunluğunun artırılması, kayma dayanımının yükseltilmesi, rijitliğin geliştirilmesi ve boşluk suyu basıncı artışının kontrol altına alınması şeklinde özetlenebilir. Günümüzde birçok büyük geoteknik projede bu mekanizmalardan bir veya birkaçını birlikte kullanan hibrit çözümler tercih edilmektedir (Kirsch & Bell, 2013).

Bu çalışma kapsamında, sıvılaşma potansiyeline sahip zeminlerin iyileştirilmesinde yaygın olarak kullanılan Jet Grout yöntemi ele alınmış ve kolon geometrisi ile yerleşim parametrelerinin optimizasyonu üzerinde durulmuştur. Jet Grout yöntemi, farklı zemin türlerinde uygulanabilmesi, yüksek dayanımlı kolonlar oluşturabilmesi ve sıvılaşma direncini önemli ölçüde artırabilmesi nedeniyle son yıllarda geoteknik mühendisliğinde yaygın olarak tercih edilen yöntemlerden biri haline gelmiştir (Croce & Flora, 2000; Bruce, 2003; FHWA, 2015).

4. JET GROUT YÖNTEMİ İLE ZEMİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Jet Grout yöntemi, yüksek basınçlı enjeksiyon tekniği kullanılarak zemin içerisinde çimento esaslı kolonlar oluşturulmasına dayanan bir derin zemin iyileştirme yöntemidir. İlk olarak 1970'li yıllarda Japonya'da geliştirilen bu yöntem, günümüzde zemin dayanımının artırılması, oturmaların azaltılması, geçirimsizlik perdelerinin oluşturulması, kazı destek sistemlerinin geliştirilmesi ve sıvılaşma riskinin azaltılması amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır (Croce & Flora, 2000; Bruce, 2003; FHWA, 2015). Diğer zemin iyileştirme yöntemlerinden farklı olarak Jet Grout tekniği, çok geniş bir zemin türü aralığında uygulanabilmekte ve yerinde yüksek dayanımlı zemin-çimento kompozit kolonları oluşturabilmektedir.

Jet Grout uygulamasının temel prensibi, yüksek basınç altında püskürtülen çimento şerbetinin zemin yapısını parçalayarak mevcut zemin malzemesi ile

karışması ve sertleşme sonrasında yüksek dayanımlı bir kompozit yapı oluşturmasına dayanmaktadır. Oluşan kolonlar çevre zemin ile birlikte çalışarak zemin kütlesinin dayanımını, rijitliğini ve deformasyon özelliklerini iyileştirmektedir. Böylece zeminin taşıma gücü artırılmakta, oturmalar azaltılmakta ve deprem yükleri altında meydana gelebilecek deformasyonlar sınırlandırılmaktadır (Bruce, 2003; Flora et al., 2013).

Sıvılaşma potansiyeline sahip zeminlerde Jet Grout kolonları, zemin içerisinde rijit bölgeler oluşturarak gerilme dağılımını değiştirmekte ve deprem sırasında meydana gelen boşluk suyu basıncı artışının etkilerini azaltmaktadır. Kolonların yüksek dayanımı ve rijitliği sayesinde çevrimsel yükler altında zemin davranışı iyileşmekte, deformasyonlar azalmakta ve sıvılaşma kaynaklı hasarların oluşma olasılığı düşmektedir. Bu nedenle Jet Grout yöntemi özellikle yüksek deprem tehlikesine sahip bölgelerde sıvılaşma önleme amaçlı uygulamalarda önemli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Boulanger et al., 1997; FHWA, 2015).

Jet Grout kolonlarının mühendislik performansı; kolon çapı, kolon boyu, kolon aralığı, kolon yerleşim düzeni, enjeksiyon basıncı ve kullanılan bağlayıcı miktarı gibi çok sayıda parametreye bağlıdır. Bu parametrelerin uygun şekilde belirlenmesi, hem teknik performans hem de uygulama maliyeti açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle sıvılaşma önleme amaçlı projelerde, iyileştirilen alan oranı ile maliyet arasında optimum dengenin kurulması gerekmektedir (Croce & Flora, 2000; FHWA, 2015).

4.1. JET GROUT UYGULAMA PRENSİBİ

Jet Grout uygulamasında ilk olarak tasarlanan kolon eksenlerinde belirlenen derinliğe kadar delgi işlemi gerçekleştirilmektedir. Delme işlemi tamamlandıktan sonra özel nozullara sahip enjeksiyon sistemi yardımıyla yüksek basınçlı çimento şerbeti zemine püskürtülmektedir. Bu yüksek enerjili jet akımı, çevredeki zemini parçalamakta ve zemin tanelerini çimento şerbeti ile karıştırmaktadır. Enjeksiyon sırasında tij sisteminin dönme ve kontrollü yükselme hareketi sayesinde silindirik geometriye sahip kolonlar oluşturulmaktadır (Bruce, 2003; FHWA, 2015).

Jet Grout kolonlarının oluşumu temel olarak üç mekanizmaya dayanmaktadır: erozyon, karıştırma ve yer değiştirme. Erozyon aşamasında yüksek enerjili jet akımı zemin yapısını parçalamaktadır. Karıştırma aşamasında ayrışan zemin malzemesi çimento şerbeti ile homojen hale gelmektedir. Yer değiştirme aşamasında ise oluşan karışım çevredeki zemini kısmen deplase ederek kolon geometrisini oluşturmaktadır. Sertleşme sürecinin tamamlanmasının ardından yüksek dayanımlı ve düşük geçirgenlikli kolonlar elde edilmektedir (Croce & Flora, 2000; Flora et al., 2013).

Jet Grout kolonlarının çapı ve dayanımı; enjeksiyon basıncı, şerbet debisi, nozul çapı, dönme hızı, çekme hızı, zemin türü ve yeraltı su koşulları gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Bu nedenle uygulama öncesinde saha deneyleri ve deneme kolonları yardımıyla uygun tasarım parametrelerinin belirlenmesi önerilmektedir (Bruce, 2003).

4.2. JET GROUT SİSTEMLERİ

Jet Grout uygulamaları kullanılan akışkan sayısına bağlı olarak tek akışkanlı (Single Fluid), çift akışkanlı (Double Fluid) ve üç akışkanlı (Triple Fluid) sistemler olmak üzere üç ana grupta incelenmektedir (Croce & Flora, 2000).

Tek akışkanlı sistemde yalnızca çimento şerbeti kullanılmaktadır. Yüksek basınç altında zemine püskürtülen çimento şerbeti zemini parçalayarak kolon oluşumunu sağlamaktadır. Bu yöntem nispeten düşük maliyetli olup küçük ve orta çaplı kolonların oluşturulmasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Bruce, 2003).

Çift akışkanlı sistemde çimento şerbetine ilave olarak hava kullanılmaktadır. Hava desteği sayesinde jet enerjisi artırılmakta ve daha büyük çaplı kolonların oluşturulması mümkün olmaktadır. Bu yöntem özellikle daha dayanımlı zeminlerde etkili sonuçlar vermektedir (Croce & Flora, 2000).

Üç akışkanlı sistemde ise su, hava ve çimento şerbeti ayrı hatlar aracılığıyla zemine iletilmektedir. İlk aşamada yüksek basınçlı su ve hava yardımıyla zemin parçalanmakta, ardından çimento şerbeti enjekte edilmektedir. Bu sistem en büyük kolon çaplarının elde edilmesine olanak sağlamakla birlikte uygulama maliyeti diğer sistemlere göre daha yüksektir (FHWA, 2015).

4.3. JET GROUT KOLONLARININ SIVILAŞMA ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Jet Grout kolonları, sıvılaşma potansiyeline sahip zeminlerde kayma dayanımını ve rijitliği artırarak deprem davranışını iyileştirmektedir. Kolonların oluşturduğu kompozit sistem sayesinde deprem sırasında meydana gelen deformasyonlar azalmakta ve gerilme dağılımı daha dengeli hale gelmektedir. Bunun sonucunda sıvılaşma oluşumu için gerekli koşulların meydana gelme olasılığı azalmaktadır (Boulanger et al. 1997; FHWA, 2015).

Jet Grout uygulamaları sonrasında zeminin elastisite modülü, kayma mukavemeti ve taşıma gücü önemli ölçüde artmaktadır. Bu artışlar çevrimsel yükler altında zeminin sıvılaşmaya karşı direncini yükseltmektedir. Ayrıca kolonların oluşturduğu rijit yapı sayesinde oturmalar azalmakta ve temel sistemlerinin performansı iyileşmektedir (Bruce, 2003; Flora et al., 2013).

Sıvılaşma riski bulunan sahalarda kolon çapı, kolon boyu, kolon aralığı ve kolon yerleşim düzeni gibi parametreler iyileştirme performansını doğrudan etkileyen tasarım değişkenleri olarak öne çıkmaktadır. Kolon çapının artırılması veya kolon aralıklarının azaltılması, iyileştirilen alan oranını yükselterek daha güvenli bir zemin davranışı sağlamaktadır. Ancak bu durum uygulama maliyetlerini de artırmaktadır. Bu nedenle optimum tasarımın belirlenebilmesi için performans ve maliyet kriterlerinin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir (FHWA, 2015).

4.4. JET GROUT TASARIM PARAMETRELERİ

Jet Grout tasarımında temel amaç, istenilen mühendislik performansını sağlayacak kolon geometrisinin ve yerleşim düzeninin ekonomik olarak belirlenmesidir. Tasarım sürecinde dikkate alınan başlıca parametreler kolon çapı, kolon boyu, kolon aralığı, kolon sayısı ve kolon yerleşim düzenidir (Croce & Flora, 2000; FHWA, 2015).

Kolon çapı, iyileştirilen alan oranını doğrudan etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Çapın artırılması zeminin rijitliğini ve taşıma kapasitesini artırırken, kullanılan çimento miktarının yükselmesine bağlı olarak maliyetleri de artırmaktadır. Benzer şekilde kolon boyunun artırılması daha derin zemin tabakalarının iyileştirilmesini sağlamakta ancak uygulama süresini ve maliyetleri yükseltmektedir.

Kolon aralığı ve yerleşim düzeni ise kolonlar arasında oluşan kompozit davranışı belirlemektedir. Kare ve üçgen yerleşim düzenleri uygulamada yaygın olarak kullanılmakta olup, kolonlar arasındaki mesafenin azaltılması sıvılaşma direncini artırmaktadır. Bununla birlikte aşırı sık yerleşimler gereksiz maliyet artışlarına neden olabilmektedir (FHWA, 2015).

Bu nedenle son yıllarda Jet Grout tasarımında optimizasyon algoritmalarının kullanımı yaygınlaşmıştır. Optimizasyon teknikleri sayesinde farklı tasarım değişkenleri eş zamanlı olarak değerlendirilmekte ve hem teknik performans hem de maliyet açısından en uygun çözüm belirlenebilmektedir. Bu çalışma kapsamında da Jet Grout kolon geometrisinin optimizasyonu Diferansiyel Evrim (Differential Evolution-DE) algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen tasarımlar PLAXIS analizleri ile değerlendirilmiştir.

5. OPTİMİZASYON

Mühendislik problemlerinde tasarım süreci çoğu zaman birden fazla değişkenin eş zamanlı olarak değerlendirilmesini gerektirmektedir. Tasarım değişkenlerinin sayısının artması ve bu değişkenler arasındaki ilişkilerin karmaşık hale gelmesi, geleneksel deneme-yanılma yöntemlerinin yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle son yıllarda mühendislik tasarımlarında optimizasyon tekniklerinin kullanımı giderek yaygınlaşmıştır (Deb, 2001; Rao, 2009).

Optimizasyon, belirli kısıtlar altında tanımlanan bir amaç fonksiyonunun en iyi değerini sağlayan tasarım değişkenlerinin belirlenmesi süreci olarak tanımlanmaktadır. Mühendislik uygulamalarında amaç fonksiyonu; maliyetin minimize edilmesi, dayanımın artırılması, deformasyonların azaltılması veya güvenlik katsayısının yükseltilmesi gibi farklı hedefleri içerebilmektedir. Optimizasyon yöntemleri sayesinde çok sayıda tasarım alternatifi sistematik olarak değerlendirilebilmekte ve en uygun çözüm belirlenebilmektedir (Arora, 2012).

Geoteknik mühendisliğinde optimizasyon yöntemleri; temel tasarımı, şev stabilitesi, tünel mühendisliği, geosentetik uygulamaları ve zemin iyileştirme

projelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle zemin iyileştirme projelerinde çok sayıda tasarım değişkeninin bulunması ve bu değişkenlerin birbirleriyle etkileşim halinde olması, optimizasyon tekniklerinin önemini artırmaktadır (Das & Suganthan, 2011).

Jet Grout uygulamalarında kolon çapı, kolon boyu, kolon aralığı, kolon sayısı ve kolon yerleşim düzeni gibi birçok tasarım parametresi iyileştirme performansını doğrudan etkilemektedir. Bu parametrelerin her biri sıvılaşma direnci üzerinde olumlu etkiler oluştururken aynı zamanda uygulama maliyetlerini de artırabilmektedir. Bu nedenle teknik performans ile ekonomik gereksinimler arasında optimum bir denge kurulması gerekmektedir (FHWA, 2015).

Geleneksel optimizasyon yöntemleri genellikle doğrusal ve türevlenebilir problemlerde başarılı sonuçlar vermektedir. Ancak geoteknik problemlerin büyük bölümü doğrusal olmayan davranışlar içermekte, çok sayıda yerel optimum nokta barındırmakta ve karmaşık kısıt koşullarına sahip olmaktadır. Bu nedenle son yıllarda evrimsel ve sezgisel optimizasyon algoritmaları mühendislik uygulamalarında daha fazla tercih edilmeye başlanmıştır (Goldberg, 1989; Deb, 2001).

Genetik Algoritma (GA), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Yapay Arı Kolonisi (ABC) ve Diferansiyel Evrim (DE) algoritmaları günümüzde yaygın olarak kullanılan evrimsel optimizasyon yöntemleri arasında yer almaktadır. Bu algoritmalar, karmaşık ve doğrusal olmayan problemlerde global optimum çözüme ulaşabilme yetenekleri sayesinde geoteknik mühendisliği problemlerinde başarılı sonuçlar vermektedir (Kennedy & Eberhart, 1995; Karaboga, 2005; Das & Suganthan, 2011).

Bu çalışma kapsamında, Jet Grout kolonlarının tasarım parametrelerinin belirlenmesinde Diferansiyel Evrim algoritması tercih edilmiştir. DE algoritmasının az sayıda kontrol parametresi gerektirmesi, sürekli değişkenli problemlerde yüksek performans göstermesi ve yerel optimum çözümlere takılma olasılığının düşük olması, bu tercihin temel nedenlerini oluşturmaktadır (Storn & Price, 1997; Price et al., 2005).

5.1. DİFFERENTIAL EVOLUTION (DE) ALGORİTMASI

Diferansiyel Evrim (Differential Evolution-DE), Rainer Storn ve Kenneth Price tarafından 1995 yılında geliştirilmiş ve 1997 yılında bilimsel literatüre kazandırılmış popülasyon tabanlı evrimsel bir optimizasyon algoritmasıdır. Algoritma, özellikle sürekli değişkenlere sahip mühendislik problemlerinde yüksek performans göstermesi nedeniyle birçok farklı disiplin tarafından yaygın şekilde kullanılmaktadır (Storn & Price, 1997).

DE algoritması, rastgele oluşturulan başlangıç popülasyonu ile çalışmaktadır. Popülasyondaki her birey, optimizasyon problemine ait tasarım değişkenlerinin belirli bir kombinasyonunu temsil etmektedir. Algoritmanın temel amacı, nesiller boyunca daha iyi çözümler üreterek amaç fonksiyonunun optimum değerine

ulaşmaktır. Bu süreç boyunca bireyler sürekli olarak güncellenmekte ve daha iyi çözümler popülasyonda korunmaktadır (Price et al., 2005).

DE algoritması temel olarak üç ana işlemden oluşmaktadır:

Mutasyon (Mutation)

Mutasyon aşamasında mevcut popülasyondaki bireyler kullanılarak yeni aday çözümler oluşturulmaktadır. Bu işlem sırasında rastgele seçilen bireyler arasındaki fark vektörü belirli bir ölçekleme faktörü ile çarpılarak başka bir bireye eklenmektedir. Böylece çözüm uzayında yeni bölgelerin araştırılması sağlanmaktadır (Storn & Price, 1997).

Mutasyon işlemi denklem 5.1 eşitlikle ifade edilmektedir:

$$V_{\{i,G\}} = X_{\{r_1,G\}} + F\left(X_{\{r_2,G\}} - X_{\{r_3,G\}}\right) \quad (5.1)$$

Burada;

- **Vi,G** : Mutant vektör
- **Xr1,G** : Rastgele seçilen birinci birey
- **Xr2,G** : Rastgele seçilen ikinci birey
- **Xr3,G** : Rastgele seçilen üçüncü birey
- **F** : Ölçekleme faktörü (Scaling Factor)
- **G** : Nesil numarası (Generation)

Ölçekleme faktörü genellikle 0,4 ile 1,0 arasında seçilmektedir ve algoritmanın yakınsama hızını doğrudan etkilemektedir (Price et al. 2005).

Çaprazlama (Crossover)

Çaprazlama aşamasında mevcut bireyler ile mutasyon sonucunda elde edilen bireyler arasında bilgi alışverişi gerçekleştirilmektedir. Bu işlem sayesinde yeni aday çözümler oluşturulmakta ve popülasyonun çeşitliliği korunmaktadır. Çaprazlama oranı (CR) parametresi, yeni oluşturulan bireylerin mevcut popülasyondan ne ölçüde farklı olacağını belirlemektedir (Das & Suganthan, 2011).

Seçilim (Selection)

Seçilim aşamasında amaç fonksiyonu açısından daha iyi performans gösteren bireyler bir sonraki nesile aktarılmaktadır. Eğer yeni oluşturulan aday çözüm mevcut çözümden daha iyi sonuç veriyorsa popülasyonda tutulmakta, aksi durumda mevcut birey korunmaktadır. Bu süreç her nesilde tekrar edilerek algoritmanın optimum çözüme doğru yakınsaması sağlanmaktadır (Storn & Price, 1997).

DE algoritmasının en önemli avantajları arasında hızlı yakınsama yeteneği, az sayıda kontrol parametresi gerektirmesi, uygulanmasının kolay olması ve yerel optimum çözümlere takılma olasılığının düşük olması yer almaktadır. Bu

özellikleri nedeniyle son yıllarda geoteknik mühendisliği problemlerinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Temel tasarımı, şev stabilitesi, zemin iyileştirme uygulamaları ve geoteknik parametre kalibrasyonu gibi birçok alanda başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Das & Suganthan, 2011; Gandomi et al., 2013).

Bu çalışmada Diferansiyel Evrim algoritması, Jet Grout kolon çapı, kolon boyu, kolon aralığı, kolon sayısı ve kolon yerleşim düzeni gibi tasarım değişkenlerinin optimize edilmesinde kullanılmıştır. Algoritma tarafından üretilen her aday çözüm PLAXIS analizleri ile değerlendirilmiş ve sıvılaşma güvenliğini sağlayan en ekonomik tasarım alternatiflerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

6. JET GROUT TASARIM PARAMETRELERİNİN DIFFERENTIAL EVOLUTION İLE OPTİMİZASYONU

Jet Grout uygulamalarında iyileştirme performansı; kolon geometrisi, kolon yerleşim düzeni ve iyileştirme oranı gibi birçok tasarım değişkeninden etkilenmektedir. Tasarım sürecinde bu parametrelerin uygun şekilde belirlenmesi, hem sıvılaşma riskinin azaltılması hem de uygulama maliyetlerinin kontrol altında tutulabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Geleneksel tasarım yaklaşımlarında kolon çapı, kolon boyu ve kolon aralıkları çoğunlukla mühendislik deneyimine dayalı olarak belirlenmektedir. Ancak tasarım değişkenlerinin fazla olması ve bu değişkenlerin birbirleriyle etkileşim halinde bulunması nedeniyle optimum çözümün belirlenmesi güçleşmektedir (FHWA, 2015; Bruce, 2003).

Bu nedenle son yıllarda geoteknik mühendisliğinde optimizasyon algoritmalarının kullanımı giderek yaygınlaşmıştır. Özellikle evrimsel optimizasyon yöntemleri, doğrusal olmayan davranışlar içeren geoteknik problemlerde başarılı sonuçlar vermekte ve çok sayıda tasarım değişkeninin eş zamanlı değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Das & Suganthan, 2011). Bu çalışma kapsamında Jet Grout tasarım parametrelerinin optimizasyonu için Diferansiyel Evrim (DE) algoritması kullanılmıştır.

6.1. Tasarım Değişkenleri

Optimizasyon sürecinde Jet Grout uygulamasının performansını doğrudan etkileyen temel tasarım değişkenleri dikkate alınmıştır. Bu değişkenler aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

- Kolon çapı (D)
- Kolon boyu (L)
- Kolonlar arası mesafe (S)
- Kolon sayısı (N)
- Kolon yerleşim düzeni (R)

Bu parametreler hem sıvılaşma güvenliği hem de uygulama maliyeti üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Kolon çapı ve kolon sayısının artması iyileştirme

oranını artırırken maliyetleri yükseltmekte, kolon aralıklarının büyümesi ise maliyetleri azaltmasına rağmen sıvılaşma performansını olumsuz etkileyebilmektedir (Croce & Flora, 2000; FHWA, 2015).

Çalışma kapsamında kullanılan tasarım değişkenlerine ait sınır değerler saha koşulları, uygulama kabiliyetleri ve literatürde önerilen Jet Grout tasarım kriterleri dikkate alınarak belirlenmiştir.

Örnek tasarım aralıkları aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

Parametre	**Alt Sınır**	**Üst Sınır**
Kolon Çapı (D)	0.80 m	2.00 m
Kolon Boyu (L)	5.00 m	20.00 m
Kolon Aralığı (S)	1.50 m	5.00 m
Kolon Sayısı (N)	4	100

Bu sınırlar saha koşullarına bağlı olarak değiştirilebilmektedir.

6.2. Amaç Fonksiyonunun Tanımlanması

Bu çalışmanın temel amacı, sıvılaşma güvenliğini sağlayan ve aynı zamanda uygulama maliyetini minimum düzeye indiren Jet Grout tasarımının belirlenmesidir.

Bu nedenle optimizasyon probleminde amaç fonksiyonu aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$\backslash min\ C_{\{total\}}$$

Burada:

$$C_{\{total\}} = C_{\{drilling\}} + C_{\{grout\}} + C_{\{labor\}} + C_{\{equipment\}}$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Toplam maliyet temel olarak;

$$C_{\{total\}}: Toplam\ maliyet$$

$$C_{\{drilling\}}: Sondaj\ (delgi) maliyeti$$

$$C_{\{grout\}}: Enjeksiyon\ (grout) malzeme\ maliyeti$$

$$C_{\{labor\}}: \text{İşçilik } maliyeti$$

$$C_{\{equipment\}}: Ekipman\ maliyeti$$

oluşmaktadır (FHWA, 2015).

Ancak maliyet minimizasyonunun tek başına yeterli olmadığı açıktır. Tasarımın kabul edilebilmesi için sıvılaşma güvenlik koşulunun da sağlanması

gerekmektedir. Bu nedenle optimizasyon problemine aşağıdaki performans kısıtı eklenmiştir:

$$FS_{\{liq\}\backslash geq 1.20}$$

Burada; $FS_{\{liq\}}$ iyileştirme sonrasındaki sıvılaşma güvenlik katsayısını ifade etmektedir.

Bu yaklaşım sayesinde yalnızca ekonomik değil aynı zamanda mühendislik açısından güvenli tasarımların elde edilmesi hedeflenmiştir.

6.3. PLAXIS Analizleri ile Performans Değerlendirmesi

DE algoritması tarafından üretilen her aday tasarım çözümü, PLAXIS ortamında oluşturulan sayısal model yardımıyla değerlendirilmiştir. Analizlerde Jet Grout kolonları ve çevre zemin birlikte modellenmiş, iyileştirme sonrasında oluşan deformasyonlar, gerilme dağılımları ve sıvılaşma performansı incelenmiştir.

PLAXIS analizleri sayesinde;

- Oturma miktarları,
- Gerilme dağılımları,
- Deplasmanlar,
- Güvenlik katsayıları,
- Sıvılaşma performansı

Belirlenmiştir (Brinkgreve et al. 2024).

Her tasarım kombinasyonu için elde edilen analiz sonuçları amaç fonksiyonuna aktarılmış ve DE algoritması tarafından değerlendirilmiştir. Böylece optimizasyon süreci tamamen performans tabanlı bir yaklaşımla gerçekleştirilmiştir.

6.4.Optimizasyon Süreci

Optimizasyon süreci aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır:

1. Başlangıç popülasyonunun oluşturulması.
2. Tasarım değişkenlerinin rastgele atanması.
3. Her birey için Jet Grout modelinin oluşturulması.
4. PLAXIS analizlerinin gerçekleştirilmesi.
5. Sıvılaşma güvenlik katsayısının hesaplanması.
6. Toplam maliyetin belirlenmesi.
7. Amaç fonksiyonunun değerlendirilmesi.
8. Mutasyon, çaprazlama ve seçilim işlemlerinin uygulanması.

9. Yakınsama kriteri sağlanıncaya kadar işlemlerin tekrarlanması.

Bu süreç sonucunda sıvılaşma güvenliğini sağlayan ve minimum maliyet oluşturan tasarım parametreleri belirlenmiştir (Storn & Price, 1997; Price et al., 2005).

6.5.Optimizasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi

DE algoritması tarafından üretilen aday çözümler arasında yapılan karşılaştırmalar sonucunda, sıvılaşma güvenlik katsayısını sağlayan ve aynı zamanda minimum maliyet oluşturan tasarım parametreleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, kolon çapı ve kolonlar arası mesafe parametrelerinin hem sıvılaşma performansı hem de maliyet üzerinde en etkili değişkenler olduğunu göstermiştir.

Analiz sonuçları, kolon çapındaki artışın sıvılaşma direncini artırdığını ancak belirli bir değerden sonra maliyet artışının performans kazancına göre daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Benzer şekilde kolon aralıklarının azaltılması sıvılaşma güvenliğini artırmasına rağmen toplam maliyeti yükseltmektedir. Bu nedenle optimum tasarımın belirlenmesinde performans ve maliyet kriterlerinin birlikte değerlendirilmesi gerektiği görülmüştür.

Bu optimizasyon yaklaşımı sayesinde Jet Grout kolonlarının geometrik özellikleri ile sıvılaşma performansı arasındaki ilişki ortaya konulmuş ve optimum tasarım parametrelerinin belirlenmesine yönelik bilimsel bir çerçeve oluşturulmuştur. Ayrıca elde edilen sonuçlar, Diferansiyel Evrim algoritmasının Jet Grout tasarımında etkin ve güvenilir bir optimizasyon aracı olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

7. SONUÇ

Bu çalışmada, sıvılaşma potansiyeline sahip zeminlerin Jet Grout yöntemi ile iyileştirilmesi ve Jet Grout tasarım parametrelerinin Diferansiyel Evrim (Differential Evolution-DE) algoritması kullanılarak optimize edilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında öncelikle saha verileri kullanılarak sıvılaşma analizleri gerçekleştirilmiş, mevcut zemin koşullarının deprem etkileri altındaki davranışı değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, iyileştirme uygulanmayan zemin profilinde sıvılaşma riskinin bulunduğu ve güvenlik katsayısının kabul edilebilir seviyelerin altında kaldığı belirlenmiştir. Daha sonra Jet Grout yöntemi kullanılarak zemin iyileştirme modelleri oluşturulmuş ve iyileştirme sonrasındaki performans analizleri gerçekleştirilmiştir.

Analiz sonuçları, Jet Grout kolonlarının zemin davranışı üzerinde önemli iyileştirici etkiler oluşturduğunu göstermiştir. Jet Grout uygulaması sonrasında zemin rijitliğinde ve kayma dayanımında belirgin artışlar meydana gelmiş, buna bağlı olarak sıvılaşma potansiyelinde önemli ölçüde azalma gözlenmiştir. Ayrıca iyileştirme sonrasında meydana gelen oturmaların azaldığı ve zemin içerisindeki gerilme dağılımının daha dengeli hale geldiği belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, Jet Grout yönteminin sıvılaşma riski taşıyan zeminlerin iyileştirilmesinde etkili bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır (Bruce, 2003; FHWA, 2015).

Çalışmada kullanılan Diferansiyel Evrim algoritması, Jet Grout tasarım parametrelerinin optimizasyonunda başarılı sonuçlar vermiştir. Optimizasyon süreci sonucunda, sıvılaşma güvenliğini sağlayan ve aynı zamanda uygulama maliyetini minimum düzeyde tutan tasarım alternatifleri belirlenmiştir. Özellikle kolon çapı ve kolonlar arası mesafe parametrelerinin hem sıvılaşma performansı hem de toplam maliyet üzerinde belirleyici etkiler oluşturduğu görülmüştür. Bu durum, Jet Grout tasarımında söz konusu parametrelerin dikkatli şekilde seçilmesinin teknik ve ekonomik açıdan büyük önem taşıdığını göstermektedir (Storn & Price, 1997; Price et al., 2005).

DE algoritması tarafından gerçekleştirilen optimizasyon yaklaşımı, geleneksel deneme-yanılma yöntemlerine kıyasla daha sistematik, hızlı ve güvenilir sonuçlar üretmiştir. Çok sayıda tasarım değişkeninin aynı anda değerlendirilmesine olanak sağlayan bu yöntem sayesinde optimum çözümler daha kısa sürede belirlenebilmiştir. Ayrıca algoritmanın sürekli değişkenli problemlerdeki yüksek performansı, Jet Grout tasarım problemleri gibi karmaşık geoteknik mühendisliği uygulamalarında etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir (Das & Suganthan, 2011).

PLAXIS analizlerinden elde edilen sonuçlar, Jet Grout kolonlarının zemin deformasyonlarını azaltarak daha güvenli bir zemin davranışı oluşturduğunu ortaya koymuştur. İyileştirme sonrasında oluşan gerilme dağılımlarının daha homojen hale geldiği, oturma miktarlarının azaldığı ve sıvılaşma kaynaklı performans kayıplarının önemli ölçüde sınırlandırıldığı belirlenmiştir. Bu durum, Jet Grout kolonlarının yalnızca sıvılaşma güvenliğini artırmakla kalmayıp aynı zamanda yapı-zemin etkileşimini de olumlu yönde etkilediğini göstermektedir.

Sonuç olarak, Jet Grout yöntemi sıvılaşma potansiyeline sahip zeminlerin iyileştirilmesinde etkili ve uygulanabilir bir çözüm sunarken, Diferansiyel Evrim algoritması ile desteklenen optimizasyon yaklaşımı daha güvenli ve ekonomik tasarımların elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu çalışma, sıvılaşmaya karşı gerçekleştirilecek zemin iyileştirme projelerinde optimizasyon tabanlı tasarım yaklaşımlarının kullanılabileceğini ortaya koymakta ve geoteknik mühendisliğinde yapay zekâ tabanlı optimizasyon yöntemlerinin kullanımına katkı sağlamaktadır.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, optimizasyon sürecine yalnızca maliyet ve sıvılaşma güvenliği değil; oturma miktarı, deformasyon performansı ve karbon ayak izi gibi ek performans kriterlerinin de dahil edilmesi önerilmektedir. Ayrıca Genetik Algoritma (GA), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Yapay Arı Kolonisi (ABC) gibi farklı optimizasyon yöntemleri ile Diferansiyel Evrim algoritmasının performanslarının karşılaştırılması faydalı olacaktır.

Bunun yanında, farklı deprem büyüklükleri, farklı zemin profilleri ve değişken yeraltı su seviyesi koşulları altında gerçekleştirilecek parametrik çalışmaların Jet Grout tasarımına ilişkin daha kapsamlı sonuçlar sağlayacağı düşünülmektedir. Gerçek saha uygulamalarından elde edilecek veriler ile sayısal model sonuçlarının karşılaştırılması da yöntemin güvenilirliğinin artırılmasına katkı sağlayacaktır.

Son olarak, yapay zekâ ve optimizasyon tekniklerinin geoteknik mühendisliğinde kullanımının giderek yaygınlaşacağı öngörülmekte olup, bu tür yöntemlerin zemin iyileştirme tasarımlarında mühendislik karar süreçlerini destekleyen önemli araçlar haline geleceği değerlendirilmektedir.

REFERANSLAR

Arora, J. S. (2012). *Introduction to Optimum Design* (3rd ed.). Academic Press.

Bruce, D. A. (2003). *Jet Grouting*. Federal Highway Administration.

Croce, P., & Flora, A. (2000). Analysis of single-fluid jet grouting. *Géotechnique*, 50(6), 739-748.

Das, S., & Suganthan, P. N. (2011). Differential Evolution: A survey of the state-of-the-art. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 15(1), 4-31.

FHWA. (2015). *Ground Improvement Methods Reference Manual* (FHWA-NHI-16-027). Federal Highway Administration.

Flora, A., Lirer, S., & Nicotera, M. V. (2013). Jet grouting design and construction practice. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement*, 166(4), 199-214.

Hausmann, M. R. (1990). *Engineering Principles of Ground Modification*. McGraw-Hill.

Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2008). *Soil Liquefaction During Earthquakes*. Earthquake Engineering Research Institute.

Kirsch, K., & Bell, A. (2013). *Ground Improvement* (3rd ed.). CRC Press.

Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall.

Moseley, M. P., Kirsch, K., & Bell, A. (2004). *Ground Improvement* (2nd ed.). Spon Press.

Price, K., Storn, R., & Lampinen, J. A. (2005). *Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization*. Springer.

Seed, H. B. (1979). Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, 105(2), 201-255.

Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97(9), 1249-1273.

Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., et al. (2001). Liquefaction resistance of soils: Summary report from the NCEER and NSF workshops. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(10), 817-833.

BÖLÜM 12

Extreme Loading for Structures (ELS) ile Betonarme Yapıların Modellenmesi ve Aşamalı Göçme Analizi: Uygulama Adımları

Saffet Kılıçer[1]

[1] Dr. Öğr. Üyesi, Artvin Çoruh Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
0000-0002-5445-0352

1. Giriş

Mühendislik insanlık tarihi boyunca yaşamın olağan işleyişi içerisinde karşılaşılan problemlere çözüm aramıştır. İnsanların daha rahat ve refah içerisinde hayatlarını idame ettirmelerine olanak sağlamıştır. Problemlere, sorunlara ya da olağan dışı engellere sürekli temel bilimler temelli nicel yaklaşımlar ile çözüm aramışlardır. Günlük hayat içerisinde eylemlere ve süregelen davranışlara aykırı durumlarda devreye girerek problemlerini çözümüne yönelik temek görevleri üstlenmiştir. Birçok mühendislik dalı esasen benzer amaçlar ile sayısal nitelikte toplum yararına çalışmış ve çalışmaktadır.

Günümüzde toplumların neredeyse her alanına dokunan İnşaat mühendisliği birçok farklı mühendislik disiplini ile iş birliği içerisindedir. Kapsamlı olarak incelendiğinde inşaat mühendisliğinin kendi içerisinde büyük bir teknik kapsama alanı olduğu görülmektedir. İnşaat mühendisleri barajlardan, karayoluna, yapılardan yer altı yapılarına kadar hem farklı hem de bütünleştirici yapım işlerinde görev ve sorumluluk almaktadır. Bu denli geniş ve kapsamlı alana hâkim olabilmek hayatın olağan akışına uygun değildir. Bu nedenle farklı ülkelerde ve çoğrafyalar da inşaat mühendisliği birçok farklı mühendislik dalı olarak temsil edilmektedir. Bunlardan bazıları; yapı mühendisliği, geoteknik mühendisliği, ulaştırma mühendisliği, hidrolik ve su kaynakları mühendisliği, kıyı ve liman mühendisliği, yapı işletmesi ve deprem mühendislikleridir. Mühendislerin belirli bir alanda daha derin teknik bilgi ve uygulama deneyimi kazanmalarını sağlarken karmaşık mühendislik projelerinin daha güvenli, ekonomik, sürdürülebilir ve işlevsel biçimde gerçekleştirilmesine de katkı sunmaktadır. İnşaat mühendisliğinin farklı alt disiplinleri birbirinden bağımsız olmayıp proje planlama, tasarım, uygulama, denetim ve işletme süreçlerinde sürekli etkileşim içerisindedir. Bu alt disiplinler arasında yapı mühendisliği, sahip olduğu geniş uygulama alanı ve üstlendiği temel sorumluluklar nedeniyle ön plana çıkmaktadır.

20. Yüzyıl ikinci yarısından sonra yapı mühendisleri yeni bir zorluk ile karşı karşıya kalmıştır. 1950 li yıllara kadar yapılar geleneksel yükler dikkate alınmaktaydı. Gelişen teknoloji ve askeri kapasite her mühendislik dalını olduğu gibi yapı mühendislerinin ilgi alanlarında değişimde büyük rol oynamışlardır. Farklılaşan askeri kapasite ya da gelişen şehir ile yol kapasiteleri ile çarpık kentleşme yapıların öngörülemeyen yüklere maruz kalmasına zemin hazırlamıştır. Projelendirme esnasında dikkate alınan geleneksel yükler dışında şok etkisi, dolaylı etkiler ya da beklenmedik yükler mühendisleri zor durumda bırakmıştır. 20. Yüzyılın sonlarına doğru aşamalı göçme olarak adlandırılan bu yeni zorluk yapı mühendislerine yeni bir bakış açısı kazandırmıştır. Yapıların hizmet ömürleri süresince günümüzde sadece yönetmeliklerde önerilen geleneksel yüklere maruz kalamayacakları her geçen gün beklenmedik yüklere maruz kalma ihtimallerinin arttığı meydana gelen vakalar ile anlaşılmaktadır. Bu nedenle yıllar içerisinde farklı gelişmiş ülkeler bu yeni zorluğu yönetmeliklerine eklemişlerdir (Kılıçer, 2025a; Kılıçer, 2025b; Kılıçer, S., & Can, Y., 2025) .

Amerika Birleşik Devleri, Birleşik Krallık, Kanada gibi gelişmiş ülkeler sırasıyla aşamalı göçme ifadelerini yönetmeliklerine eklemişlerdir (Kokot ve Solomos, 2012). Ancak bu ekleme sadece sözel ifadelerden oluşmakta olup sayısal analiz yöntemleri ile birlikte doğrudan ve dolaylı tasarım yaklaşımları içermemektedir. 1980'li yıllardan sonra bu düzenlemelerin yürürlüğe girmesiyle birlikte, yönetmeliklerde öngörülen aşamalı göçme kontrollerinin gerçekleştirilebilmesi için sayısal analiz yöntemlerine ve bu yöntemleri uygulayabilecek mühendislik yazılımlarına duyulan ihtiyaç artmıştır. İnşaat mühendisliği paket programlarında aşamalı göçme analizi için tek bir başlangıç tarihi veya ilk program belirlemek güçtür. Aşamalı göçme analizi, başlangıçta bağımsız bir analiz modülü olarak geliştirilmemiştir. Piyasada bulunan birçok yapısal tasarım ve analiz yazılımı, çeşitli modelleme ve analiz yaklaşımları kullanılarak dolaylı biçimde aşamalı göçme analizlerinde kullanılabilmektedir. Buna karşılık, aşamalı göçme davranışını doğrudan simüle edebilen Extreme Loading for Structures (ELS), Applied Science International tarafından geliştirilmiş ve ilk ticari sürümü 2003 yılında yayımlanmış, Uygulamalı Elemanlar Yöntemi'ne dayanan bir yapısal analiz yazılımıdır. Her ne kadar programın ilk sürümü 2003 yılında yayımlanmış olsa da günümüzde ELS kullanılarak aşamalı göçme analizi ile betonarme yapıların modellenmesi ve tasarımına ilişkin işlem adımlarını ayrıntılı ve sistematik biçimde açıklayan kapsamlı bir uygulama rehberi bulunmamaktadır.

ELS yazılımı kullanılarak betonarme yapıların aşamalı göçme davranışının incelendiği Türkçe lisansüstü çalışmalar bulunmaktadır (Cicos, 2025; Zümre, 2026). Söz konusu çalışmalar, belirli yapı modellerinin analiz edilmesi ve elde edilen bulguların değerlendirilmesi açısından literatüre önemli katkılar sunmaktadır. Bununla birlikte, bu çalışmaların amaç ve kapsamları doğrultusunda; betonarme yapının oluşturulması, malzeme ve kesit özelliklerinin tanımlanması, donatıların modellenmesi, yükleme aşamalarının belirlenmesi, taşıyıcı eleman kaldırma senaryosunun uygulanması, doğrusal olmayan analiz ayarlarının yapılması ve sonuçların değerlendirilmesi gibi yazılım kullanımına ilişkin tüm aşamaların ayrıntılı ve sıralı bir uygulama rehberi biçiminde sunulması hedeflenmemiştir. Ayrıca Özmen vd. (2018), ELS yazılımını betonarme bir binanın patlayıcı kullanılarak kontrollü yıkım davranışının incelenmesinde kullanmışlardır. Son olarak Yüzbaşı (2025), beş katlı çelik bir yapının üç farklı kolon kaldırma senaryosu altındaki aşamalı göçme davranışına odaklanmaktadır. AEM tabanlıdır. Bu nedenle, işlem adımlarını net şekilde ifade eden bir kaynak mevcut çalışmaları tamamlayıcı nitelikte, aynı analiz sürecinin farklı kullanıcılar tarafından izlenebilmesine ve tekrar uygulanabilmesine olanak sağlayacak kapsamlı ve sistematik bir Türkçe uygulama kaynağının hazırlanmasının yararlı olacağı değerlendirilmektedir.

2. Metodoloji

2.1. Extreme Loading for Structures (ELS) Yazılımı

Extreme Loading for Structures (ELS), Applied Science International, LLC tarafından geliştirilen ve yapıların doğrusal olmayan davranışlarının üç boyutlu

olarak incelenmesine imkân sağlayan bir yapısal analiz yazılımıdır. Yazılım aracılığıyla yapıların statik ve dinamik yükler altındaki davranışları, yüklemenin başlangıcından elemanlarda meydana gelen hasara ve yapının kısmen veya tamamen göçmesine kadar takip edilebilmektedir. Bu nedenle deprem, patlama, darbe, şiddetli rüzgâr ve aşamalı göçme gibi yapıların ileri düzey doğrusal olmayan davranış göstermesine neden olan etkilerin incelenmesinde kullanılmaktadır (Applied Science International, LLC, 2022).

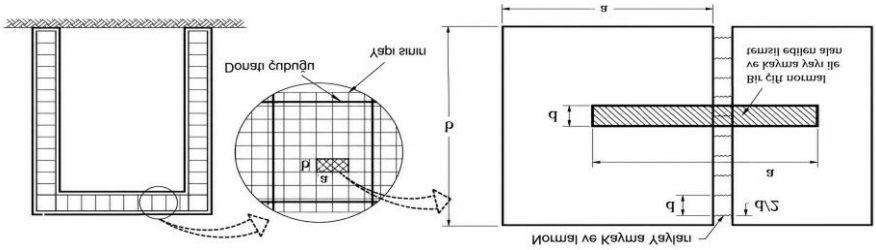
ELS, geleneksel Sonlu Elemanlar Yöntemi'nden farklı olarak Uygulamalı Elemanlar Yöntemi'ne (Applied Element Method–AEM) dayalı bir çözüm yaklaşımı da kullanmaktadır. Uygulamalı Elemanlar Yöntemi'nde yapı, birbirine temas yüzeyleri boyunca yerleştirilen normal ve kayma yaylarıyla bağlanan küçük elemanlara ayrılmaktadır. Bu yaylar, elemanlar arasındaki sürekliliği ve malzemenin mekanik özelliklerini temsil etmektedir. Yaylarda oluşan gerilme ve şekil değiştirmelerin belirlenen hasar ölçütlerine ulaşması durumunda elemanlar arasındaki bağlantılar kaldırılabilmekte ve böylece çatlak oluşumu, çatlakların ilerlemesi ve elemanların birbirinden ayrılması modellenebilmektedir (Meguro & Tagel-Din, 2000). ELS yazılımında yapıların doğrusal ve doğrusal olmayan statik veya dinamik analizleri gerçekleştirilebilmektedir. Yazılım, elastik ve elastik olmayan davranışın yanı sıra donatının akması, plastik mafsal oluşumu, burkulma ve burkulma sonrası davranış, çatlakların ilerlemesi, membran etkisi, P–Delta etkisi ve yapısal elemanların birbirinden ayrılması gibi davranışları da dikkate alabilmektedir. Elemanların ayrılmasından sonra oluşan parçaların hareketleri ile bu parçaların diğer yapı elemanlarıyla teması ve çarpışması da analiz sürecinde izlenebilmektedir. Bu özellik, başlangıçta meydana gelen yerel bir hasarın diğer taşıyıcı elemanlara yayılmasını ve yapının genel göçme davranışına dönüşmesini inceleyen aşamalı göçme analizleri bakımından önem taşımaktadır (Applied Science International, LLC, 2022; Tagel-Din & Meguro, 2000).

Bu çalışmada ELS yazılımı, betonarme bir yapının sayısal modelinin oluşturulması ve aşamalı göçme analizine hazırlanması amacıyla kullanılmıştır. Bu kapsamda yapı geometrisinin oluşturulması, malzeme ve kesit özelliklerinin tanımlanması, donatıların modellenmesi, sınır şartları ile yüklerin belirlenmesi, taşıyıcı eleman kaldırma senaryosunun uygulanması, analiz ayarlarının yapılması ve aşamalı göçme sonuçların görüntülenmesine ilişkin işlemler dikkate alınmıştır. Modellenecek betonarme yapı örneği uygulanabilmesine olanak sağlayacak biçimde sıralı işlem adımları hâlinde sunulmuştur.

2.2. Uygulamalı Elemanlar Yöntemi (AEM)

Uygulamalı Elemanlar Yöntemi, yapıların yükleme başlangıcından hasar ve göçme durumuna kadar sergilediği davranışın sayısal olarak incelenmesi amacıyla geliştirilmiş bir sayısal analiz yöntemidir. Sürekli ortam ve ayrık eleman yaklaşımlarının bazı özelliklerini bir araya getirmektedir. Yapı, hasar öncesinde bütüncül bir sistem olarak çözümlenirken taşıma kapasitesini kaybederek ayrılan parçaların bağımsız hareketleri de aynı analiz sürecinde hesaplanabilmektedir (Meguro & Tagel-Din, 2000; Shakeri & Bargi, 2015).

Taşıyıcı sistem, zahiri olarak küçük elemanlara ayrılmakta ve birbirine komşu elemanlar temas yüzeyleri boyunca yerleştirilen normal ve kayma yaylarıyla bağlanmaktadır. Normal yaylar, komşu elemanlar arasındaki normal gerilmelerin; kayma yayları ise kayma gerilmelerinin aktarılmasını sağlamaktadır. Elemanların kendi içerisinde rijit olduğu kabul edilmesine karşın yapısal deformasyonlar, bağlantı yaylarında oluşan şekil değiştirmeler aracılığıyla temsil edilmektedir. Her yay, ilişkili olduğu malzeme bölgesinin rijitlik, gerilme, şekil değiştirme ve hasar özelliklerini yansıtmaktadır (Meguro & Tagel-Din, 2000). Şekil 1'de gösterilen iki elemanın, eleman kenarları boyunca dağıtılmış temas noktalarında bulunan normal ve kayma yaylarından oluşan çiftler aracılığıyla birbirine bağlandığı kabul edilmektedir.



Şekil 1. Yapının AEM ile modellenmesi (Meguro & Tagel-Din, 2000)

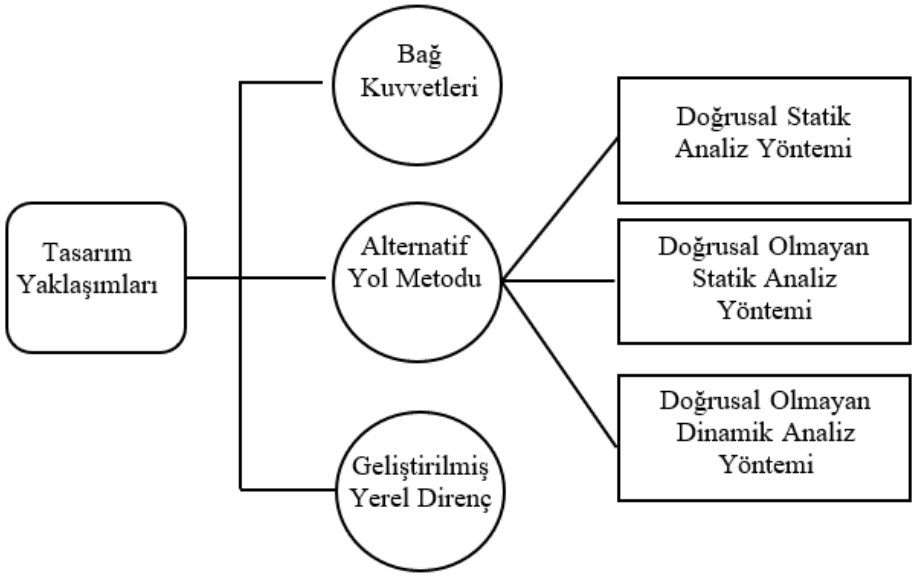
Betonarme yapıların AEM ile modellenmesinde beton ve donatı çeliği ayrı yay gruplarıyla temsil edilmektedir. Komşu elemanların temas yüzeylerinde bulunan matris yayları betonun mekanik davranışını yansıtırken donatı yayları, beton içerisine yerleştirilen donatı çubuklarının konumları, kesit alanları ve malzeme özellikleri esas alınarak tanımlanmaktadır. AEM'nin malzeme doğrusal olmadığını, büyük yer değiştirmeleri, eleman ayrılmasını ve temas davranışını aynı çözüm sürecinde dikkate alabilmesi, yöntemin aşamalı göçme analizlerinde kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Bir kolon veya perde gibi düşey taşıyıcı elemanın kaldırılmasından sonra yüklerin kalan taşıyıcı sisteme aktarılması, komşu elemanlarda oluşan iç kuvvet değişimleri ve alternatif yük aktarım mekanizmalarının gelişimi bu yöntemle incelenebilmektedir. Salem, El-Fouly ve Tagel-Din (2011), AEM ile oluşturulan betonarme yapı modelinde kolon kaybından sonra meydana gelen yük dağılımını ve göçme davranışını değerlendirmiştir. Helmy, Salem ve Mourad (2012) ise kolon ve perde kaldırma senaryolarını içeren üç boyutlu bir betonarme yapı modeli üzerinde doğrusal olmayan dinamik analizler gerçekleştirerek döşemelerin yapısal bütünlüğün korunmasına sağladığı katkıyı incelemiştir.

Çalışmada betonarme yapının modellenmesi ve aşamalı göçme analizinin gerçekleştirilmesi için ELS yazılımının AEM tabanlı çözüm yaklaşımından yararlanılmıştır. Kiriş, kolon ve döşemeler uygulamalı elemanlara ayrılmıştır. Taşıyıcı eleman kaldırma senaryosunun uygulanmasının ardından yüklerin yeniden dağılımı, yer değiştirmeler ve yapısal bütünlüğün korunup korunmadığı AEM sayesinde değerlendirilmiştir.

2.3. Aşamalı Göçme

Yapıların olağandışı etkilere maruz kalma ihtimali her geçen yıl artmaktadır. Yapı elemanları her ne kadar istatistiki olarak ülkelerin yönetmeliklerinde belirlense de şok etkilerine karşı tasarım ilk aşamada bulunmamaktadır. Oysaki günümüzde neredeyse her coğrafyada siyasi gerilim ve savaş ortamı artmaktadır. Modern savaş teknolojileri, bombalı eylemler ve günlük hayat içerisindeki ihtimali düşük olan ama gerçekleştiğinde ekonomik kayıplara yol açan farklı taşıt kazaları yapıların aşamalı göçme analizini gündeme getirmektedir.

Amerika Birleşik Devletleri'nde, General Services Administration tarafından yayımlanan aşamalı göçme kılavuzu (U.S. General Services Administration [GSA], 2016) ile Department of Defense tarafından yayımlanan UFC 4-023-03 standardı (U.S. Department of Defense [DoD], 2016) doğrultusunda, askerî ve kamu yapılarının aşamalı göçmeye karşı dayanıklı biçimde tasarlanması ve inşa edilmesi amaçlanmıştır. Bu standartlarda, Şekil 2'de gösterildiği üzere, yapıların kullanım amaçlarına göre uygulanacak analiz yöntemleri tanımlanmıştır.



Şekil 2. Tasarım Yaklaşımları

Aşamalı göçme, doğası gereği ani, zamana bağlı ve yüksek düzeyde doğrusal olmayan bir süreçtir. Yapısal davranışı daha gerçekçi biçimde temsil etmesi nedeniyle doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemi, hem literatürde hem de paket program uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu nedenle, ELS programı kullanılarak oluşturulan örnek yapı modeli doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemiyle incelenmiştir.

Alernetif Yol metodunun temel mantığını Talep-kapasite oranı oluşturmaktadır. Talep-kapasite oranı Eşitlik 1'de verilmektedir.

$$DCR = \frac{Q_{UD}}{\varphi Q_{CE}} \tag{1}$$

Burada Q_{UD}, eleman kaldırıldıktan sonra oluşan tasarım kuvveti talebini, Q_{CE}, elemanın beklenen taşıma kapasitesini; φ ise dayanım azaltma katsayısını ifade eder.

Temel düşey yük birleşimi (Eşitlik 2):

$$G_{ND} = 1.2D + (0.5L \; veya \; 0.2S) \tag{2}$$

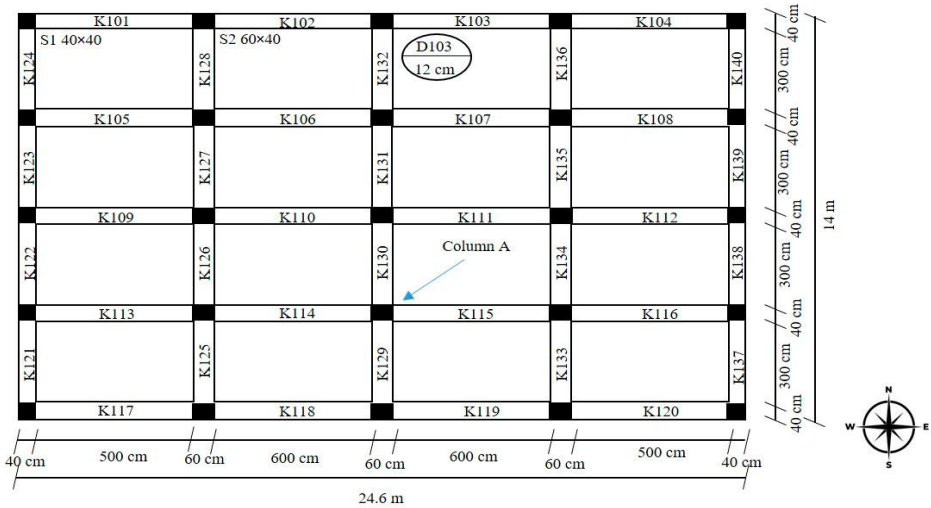
Kar yükünün etkili olmadığı durumda eşitlik (Eşitlik 3):

$$G_{ND} = 1.2D + 0.5L \tag{3}$$

şeklinde uygulanır. Burada D sabit yükü, L hareketli yükü, S ise kar yükünü göstermektedir. Eşitlik 2'de hareketli yük ve kar yükü değerlerinin birlikte toplanması değil, ilgili durum için belirleyici olanın kullanılması ifade etmektedir.

3. Betonarme Yapının Sayısal Modelleme ve Analiz Prosedürü

Betonarme Yapının Sayısal Modelleme ve Analiz Prosedürü olarak ELSv.10 bu kitap bölümünde gösterilmiştir. Modellenecek örnek betonarme yapı 6 katlıdır. Ticari kullanım amaçlı kabul edilen yapı, her iki ana doğrultuda dört açıklığa sahip düzenli bir betonarme çerçeve sistemden oluşmaktadır. Kat yüksekliği 3,0 m, toplam yapı yüksekliği 18,0 m ve plan boyutları 14,0 m × 24,6 m'dir. Döşeme kalınlığı 12 cm olarak dikkate alınmıştır. Kolon kesitleri 40 × 40 cm ve 60 × 40 cm, tüm kiriş kesitleri ise 40 × 60 cm olarak tanımlanmıştır. Betonun karakteristik basınç dayanımı 25 MPa olarak kabul edilmiştir. Yapı modelinin kalıp planı Şekil 3'de verilmektedir.

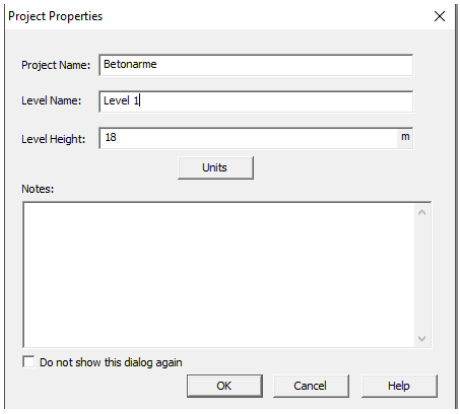


Şekil 3. Yapı modelinin kalıp planı

Örnek modelin yapı elemanlarında paspayı 5 cm kabul edilmiştir. Donatı B420C seçilmiş olup 40×40 cm^2 ve 40×60 cm^2 kolon için her iki yönde 5Ø16(#5), etriyeler ise 15 cm ara ile Ø8(#3)-3 kollu olacak şekilde tasarlanmıştır.

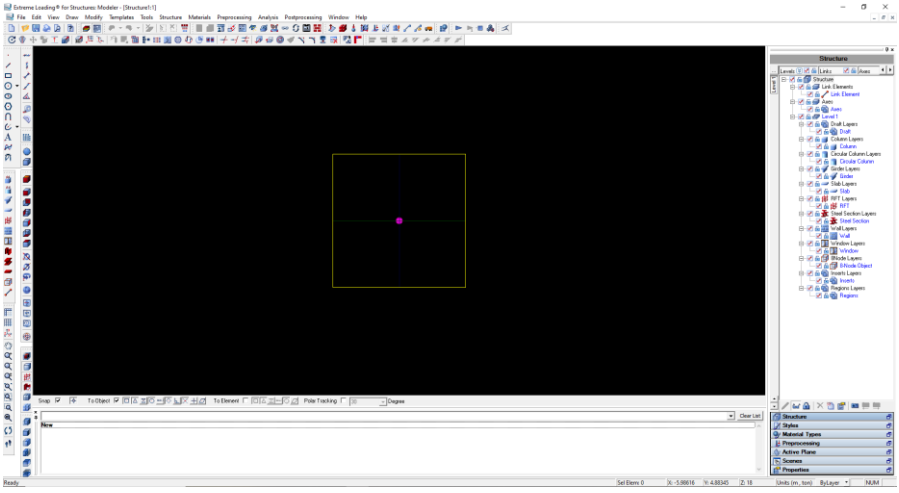
Yapı yükleri sırasıyla; öz ağırlık ara katlarda 6.79 kN/m^2, çatı katı 6.23 kN/m^2 tüm katlarda tesisat yükü 0,25 kN/m^2, Cephe yükü 2.873 kN/m^2, hareketli yük için ise her bir yönetmeliğin kendi değerleri dikkate alınmıştır.

Program açıldığında ekrana ilk olarak proje özellikleri gelmektedir. Şekil 4'de proje özellikleri ekranı verilmektedir.



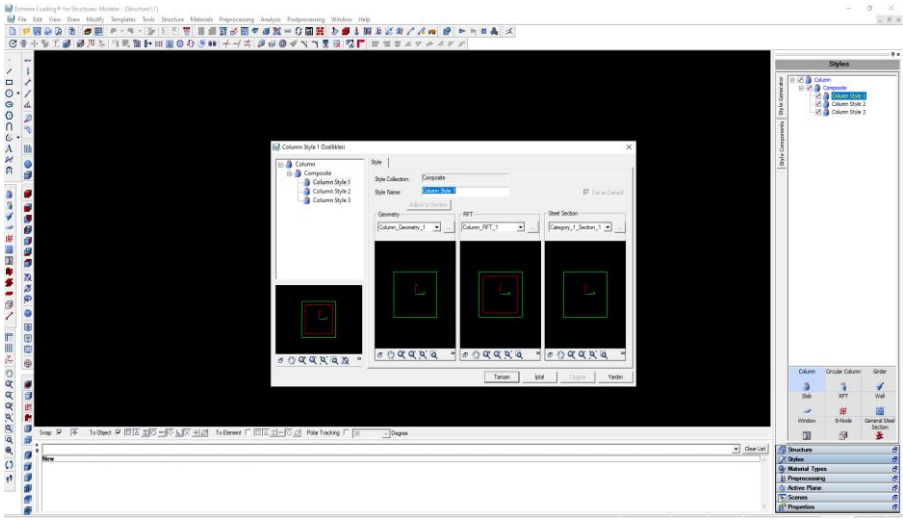
Şekil 4. Proje özellikleri

Proje ve seviye isimleri ile örnek yapı modelinin yüksekliği girilir. Bu ekranda gerekli alanlar doldurulduktan sonra OK tuşuna basılarak pencere kapatılır. Ekran kapatıldıktan sonra ekran görüntüsü Şekil 5'deki gibidir.



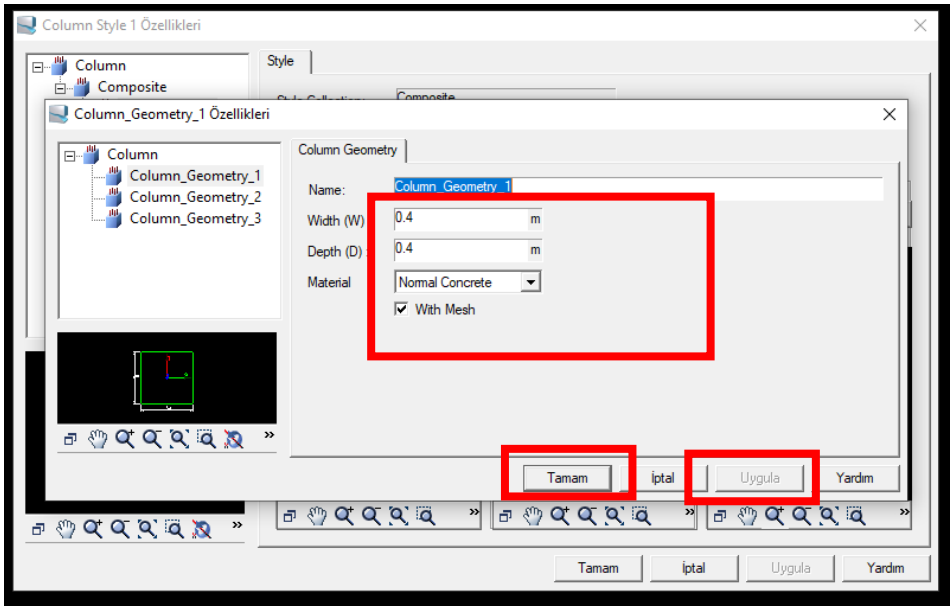
Şekil 5. Ekran görüntüsü

İlk olarak kolon özellikleri programa tanıtılacaktır. Sağ alt kısımda '*Styles*' kısmından '*Column Style 1*' seçilir ve Şekil 6'daki ekran ortaya çıkar.



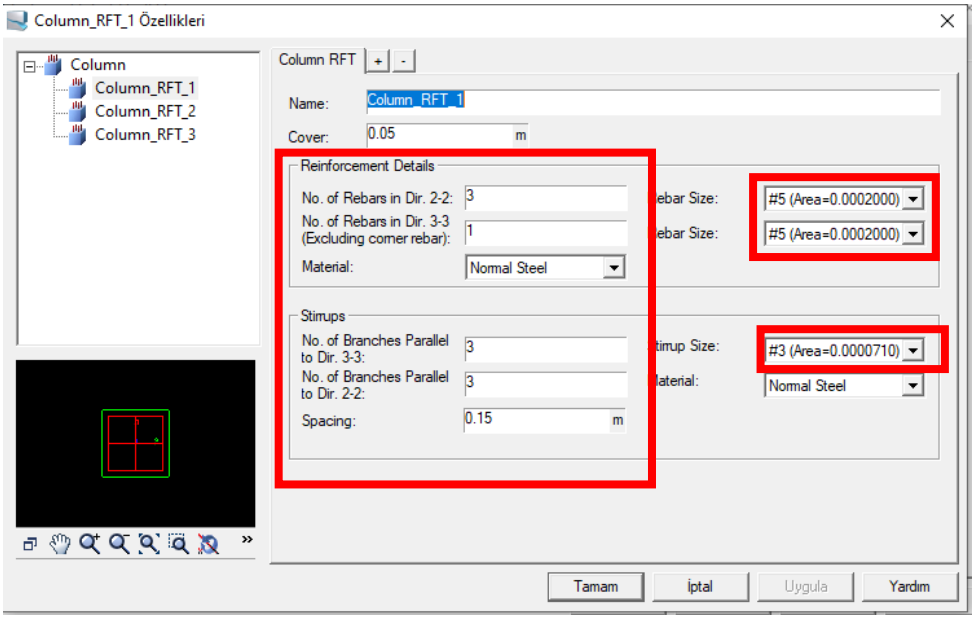
Şekil 6. Kolon detayları

Geometry kısmında üç nokta tıklandığında kolonun geometrisini girebileceğiniz ekran Şekil 7'deki gibi görünür.



Şekil 7. Kolon geometrisi

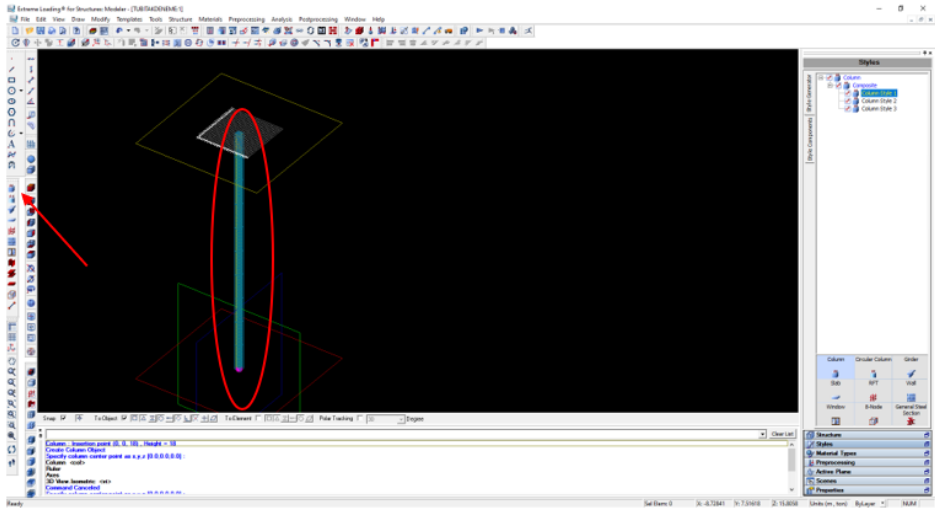
Kolonun derinlik ve genişlik değerleri metre cinsinden girilir. Ardından, Materyal bölümünden ilgili beton sınıfı seçilir ve önce '*Uygula*', ardından '*Tamam*' butonuna tıklanarak pencere kapatılır. Daha sonra '*RFT*' kısmından üç noktalı kısım tıklanır, işlem tekrarlanır ve Şekil 8'deki ekran açılır.



Şekil 8. Kolon RFT Özellikleri penceresi

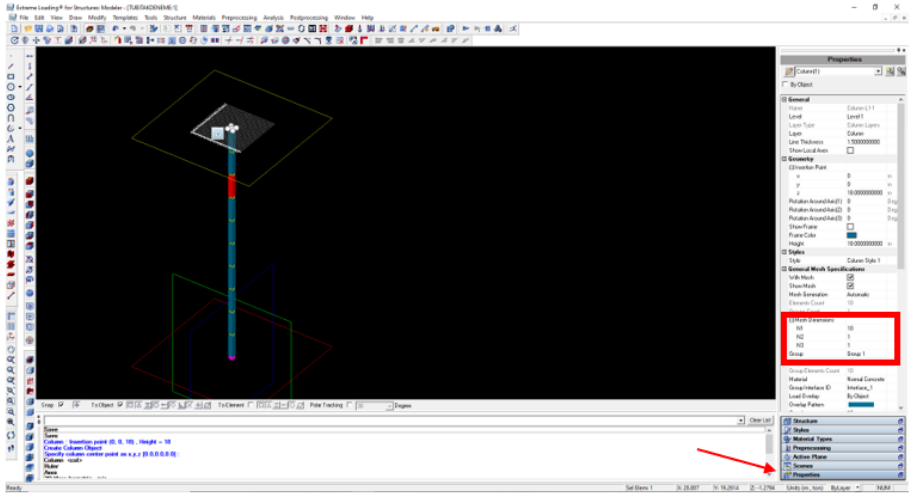
Paspayı 5 cm, etriye aralıkları 15 cm, donatı çapıda 16'lık inşaat demirine karşılık gelen #5 ile 8'lik etriye demiri için #3 seçilir. '*Uygula*' denerek '*Tamam*' ile pencere kapatılır. Daha sonra tamam denerek '*Column Style 1'* penceresi kapatılır.

Programdan kolon '*Drawn Column*' komutu seçilir ve 1 adet kolon uygun bir konuma tıklanarak çizilir. Şekil 9'da görüntü verilmektedir.



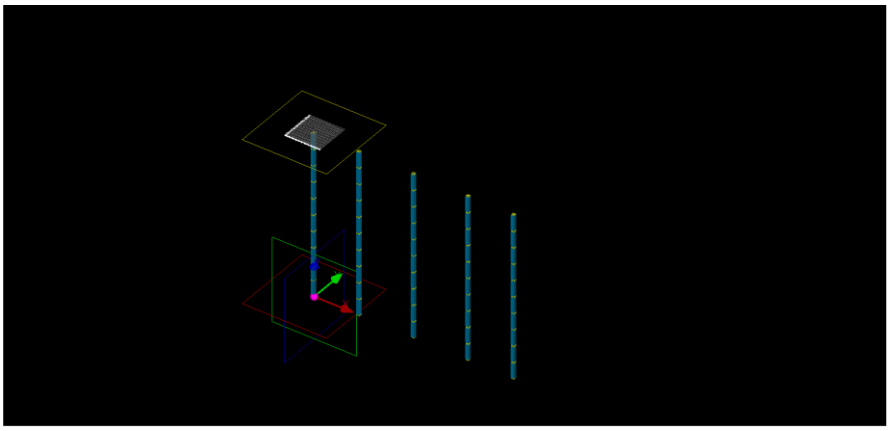
Şekil 9. Kolon RFT Özellikleri penceresi

Sağ altta 'Properties' kısmından kolonun sonlu elemanlar N1, N2 ve N3 değerleri buradan düzenlenecektir. Bu örnek için gösterim amacıyla N_1:10 N_2:1 ve N_3: 1 olarak kolon ağ yapısı tanımlanmıştır. Son görüntü Şekil 10'da verilmektedir.



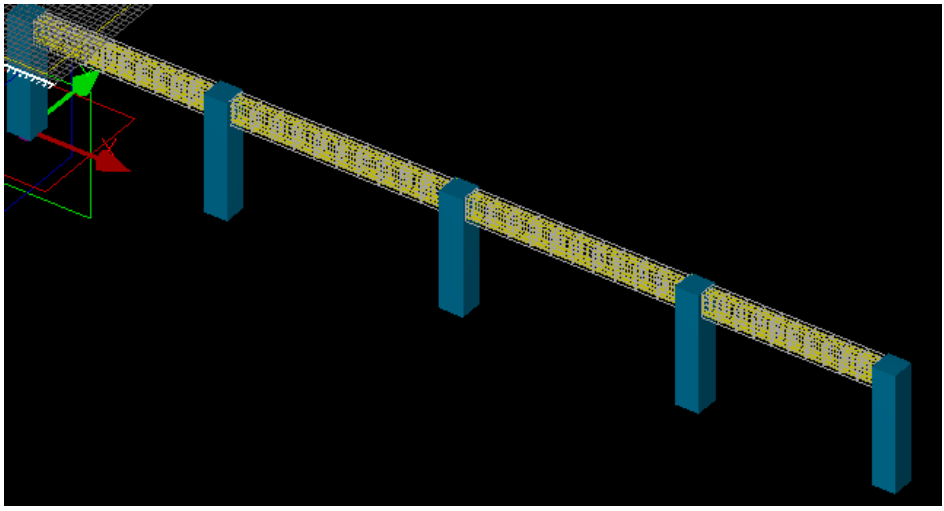
Şekil 10. Sonlu elemanlar ağ yapısı

Ağ yapısı oluşturulduktan sonra devamında kolonu kopyalamak için kolon seçilir ve sağ tıklanır çıkan ekranda '*Copy*' seçilir. Kolon merkezden tutularak istenen uzaklığa komut satırına @5 yazılarak klavyeden '*Enter*' basılır (Şekil 11).



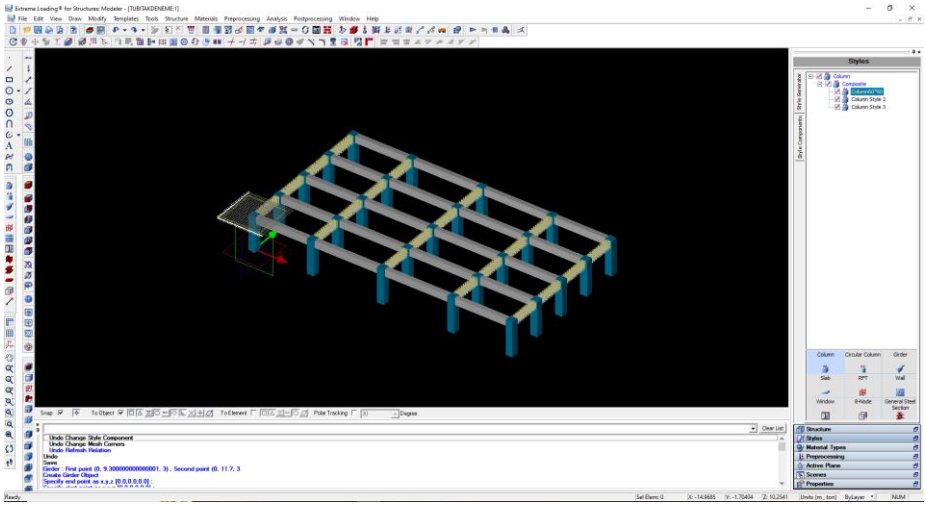
Şekil 11. Kolon kopyalama ekranı

Kalıp planına göre ilk kolon [0,0] noktasındaydı. Sırasıyla 5m, 11m, 17m ve 22m olmak üzere y=0 doğrusu üzerindeki üzerindeki 5 kolon sırasıyla kopyalandı. Daha sonra kolon stili seçilirken yapılan işlemlerin benzeri kiriş için '*girder*' kısmından tekrarlanır (Şekil 12).



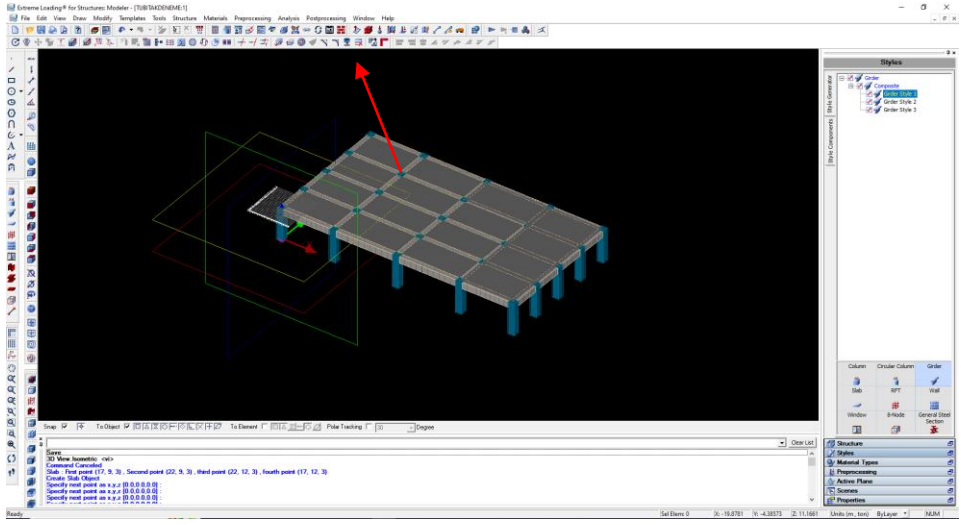
Şekil 12. Kiriş ve kolon görünümü (Tek aks)

Mevcut aksı çoğaltmak için '*Array*' komutu kullanılır. Ve kirişler '*Girder*' komutuyla çizilir. Kullanıcı Array komutunu kullanarak tek açıklığı çizdikten sonra çoğaltabilir ya da aks aralıkalrına kirişleri manuel oalrak kendisi atıyabilir. Tüm kolon ve kirişler çizildikten sonra ekran görüntüsü Şekil 13'de verilmektedir.



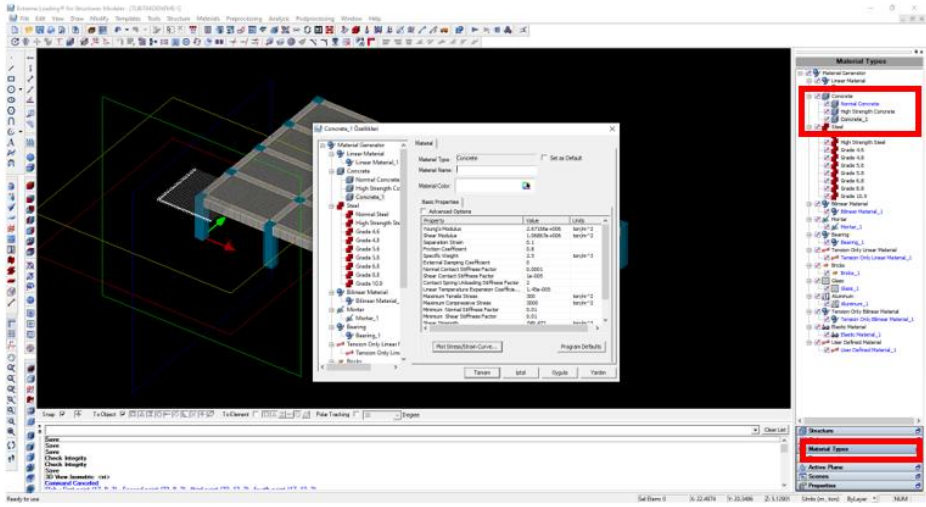
Şekil 13. Kiriş ve kolon görünümü (Tüm akslar)

Döşeme tanımlaması için kolon ve kirişlerde yapılanalar benzer olarak '*slab*' kısmından döşeme donatı özellikleri ve boyutları ile paspayı girilerek pencere kapıtılır. Devamında '*Draw slab*' kısmında döşeme seçilerek tüm gerekli yerlere döşemeler atanır (Şekil 14). Ayrıca '*Check Integry*' sekmesinden çakışma problemleri kontrol edilir.



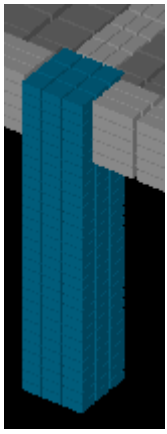
Şekil 14. Kiriş, kolon ve döşeme görünümü (Tek kat)

Doğrusal olmayan dinamik analiz yönteminde yükleri bir merkeze ya da kütle olarak malzemenin özgül ağırlığına atamanız gerekmektedir. Bu nedenle 'Concrete' kısmından sağ tıklayarak 'New Material' seçeneği tıklanır. Yeni açılan pencere Şekil 15'de verilmektedir.



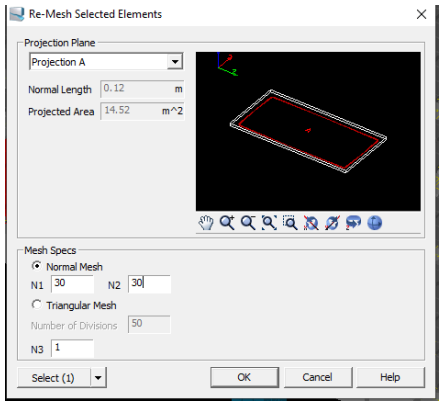
Şekil 15. Yeni malzeme tanımlama

Yeni açılan pencerede ‘weight’ kısmına girilecek yükler denklem 3 ile hesap edilerek girilir. Normal concrete kısmında ise sadece 1.2 katsayısı kullanılır. Daha sonra kaldırılacak kolonun etrafındaki tüm kolonlar ağ yapısı 30×3×3 olarak yapıldı (Şekil 16). Diğer kolonların 10×1×1 olarak bırakıldı. Kirişler içinde benzer işlemler yapıldı.

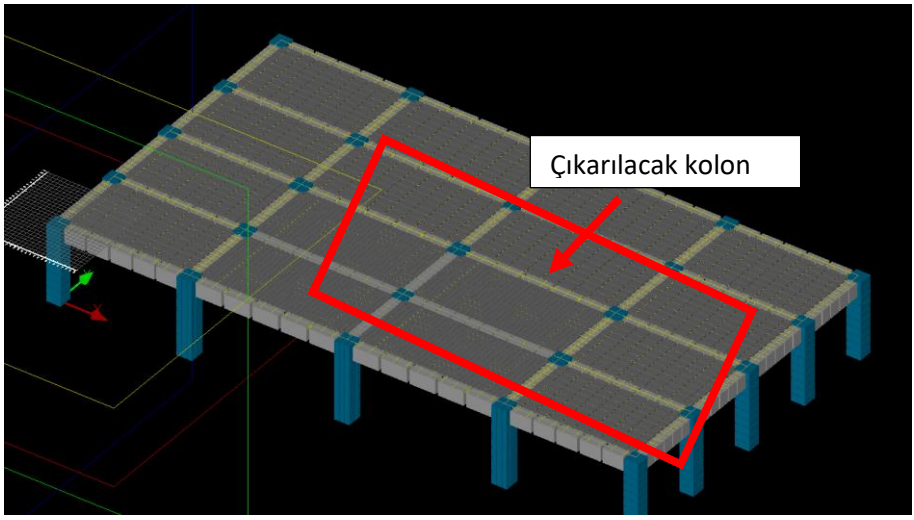


Şekil 16. Ağ yapısı

Kolon ve kiriş ağ yapısı tanımlandıktan sonra döşemenin ağ yapısını değiştirmek daha farklıdır. Döşemenin ağ yapısı kilitli olduğundan istenilen döşenin bir alanı seçilir ve sırasıyla Properties→Element Groups Specifications →Selection Options→All seçilir. Böylece döşemenin tümü seçilir. Devamında Re-Mesh Selected Elements seçilir. Buradan N1, N2 girilebilir (Şekil 17).

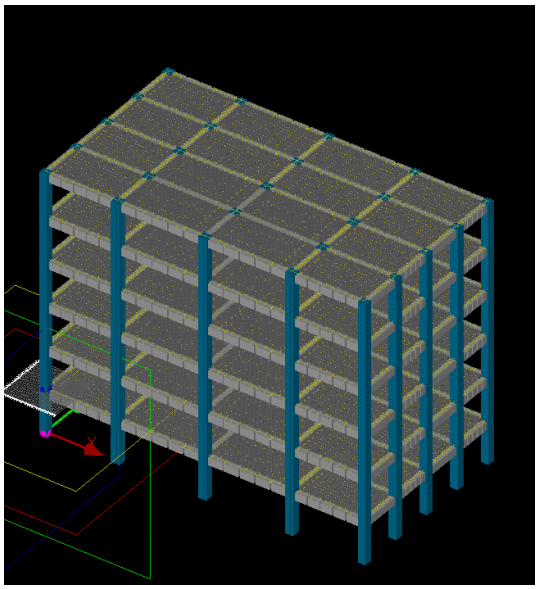


Şekil 17. Döşeme ağ yapısı



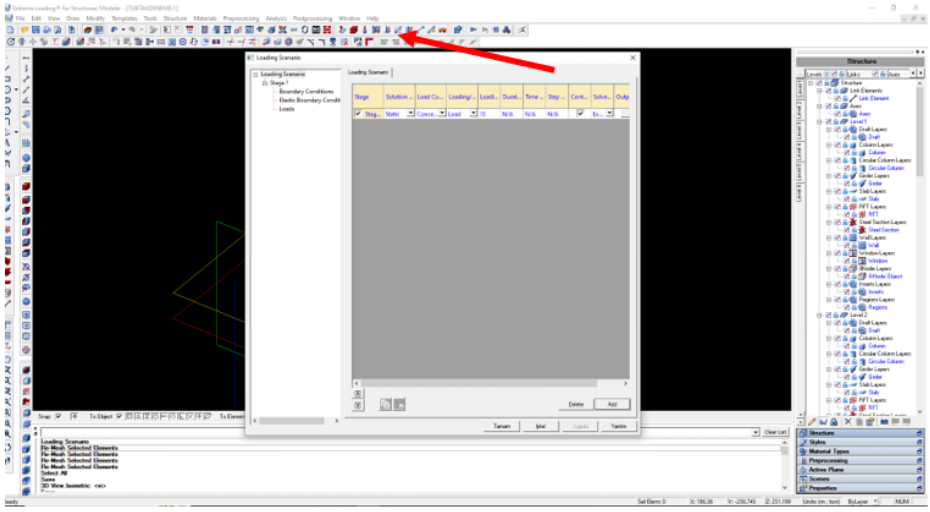
Şekil 18. Döşeme ağ yapısı

Tüm bu işlemler bittikten sonra '*Structure*' kısmından Level sekemesine sağ tıklayıp copy seçilir ardından aynı kısımdan structure sağ tıklanarak copy ve array seçilirek açılan pencerede kat sayısı girilir (Şekil 19).



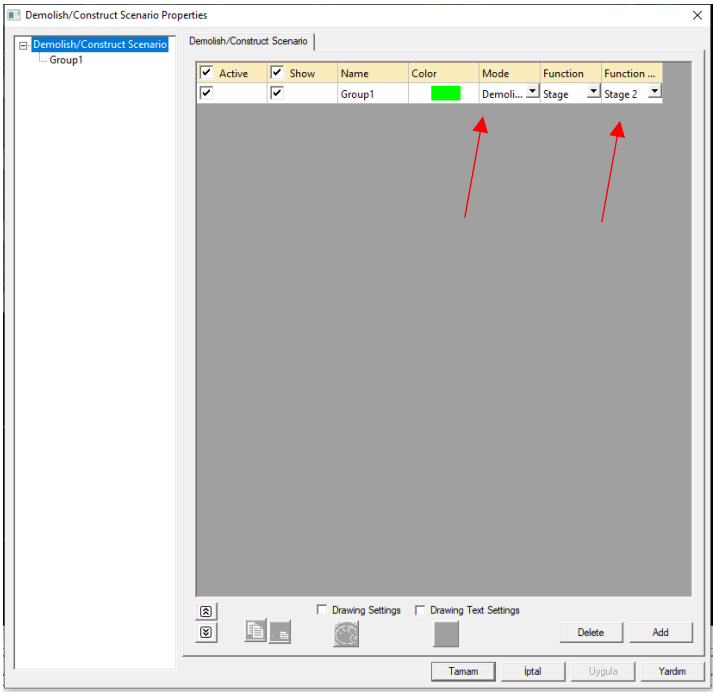
Şekil 19. İzometrik görüntü (Tüm yapı)

Yükleme kombinasyonları için '*Loading Scenario*' sekmesinden Şekil 20'deki pencere açılır.



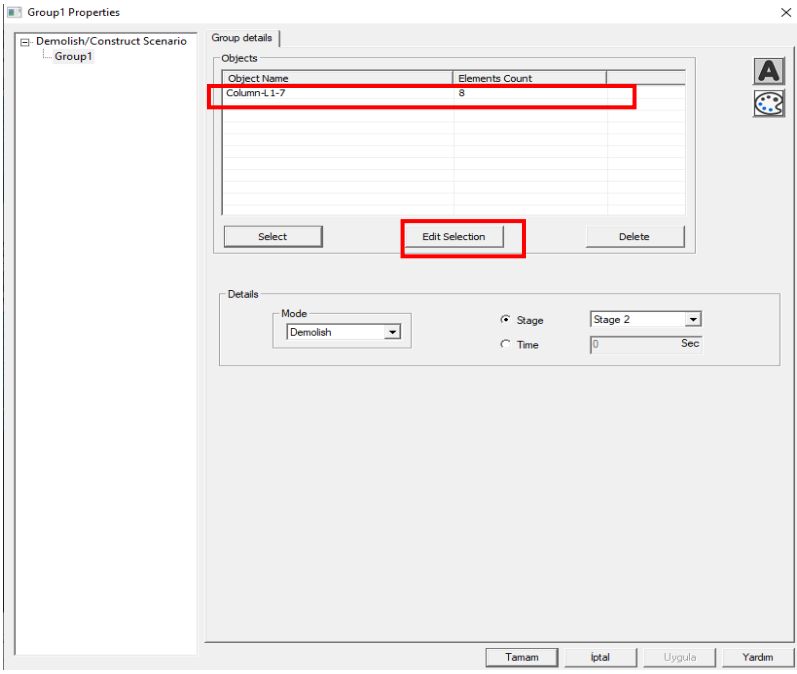
Şekil 20. *Loading Scenario* penceresi

Buradan '*Add*' kısmında dynamic olarak eklenir ve Time step kısmı 0.01 olarak girilir. Diğer parametreler örnek modele göre değiştirilebilir. Devamında '*Tamam*' tıklanarak pencere kapatılır. Ardından '*Demolish/Construct Scenario Properties*' tıklanarak açılır (Şekil 21).



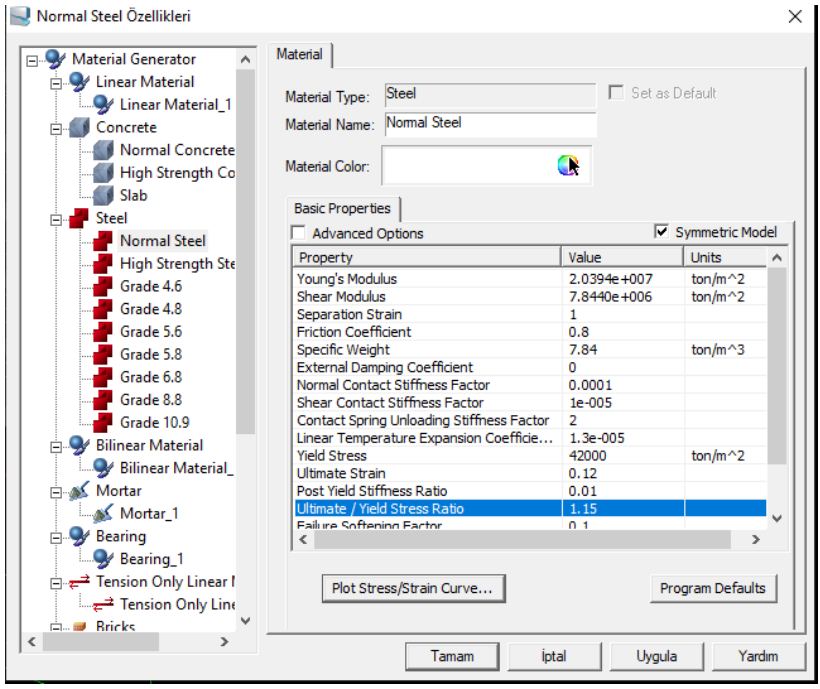
Şekil 21. '*Demolish/Construct Scenario Properties*' penceresi görünümü

Bu pencerede '*Add*' kısmında Group eklenir. Mode kısmından '*Demolish*' seçilir. Function kısmında '*Stage*' Fuction Data kısmında ise '*Stage 2 (Dinamik)*' seçilir. Burada başka yük atamaya gerek yoktur. Sol kısımdan Group 1 seçilerek Şekil 22'de verilen pencere açılır.



Şekil 22. '*Group 1 Properties*' penceresi görünümü

Açılan pencerede '*Select*' tıklanarak modelden kaldırılacak kolonun tümü seçilir. Devamında '*Uygula*' denerek '*Tamam*' seçilir ve pencere kapatılır. Son olarak model kullanılacak donatı malzeme özellikleri B420C için Şekil 23'deki gibi tanımlanıştır.



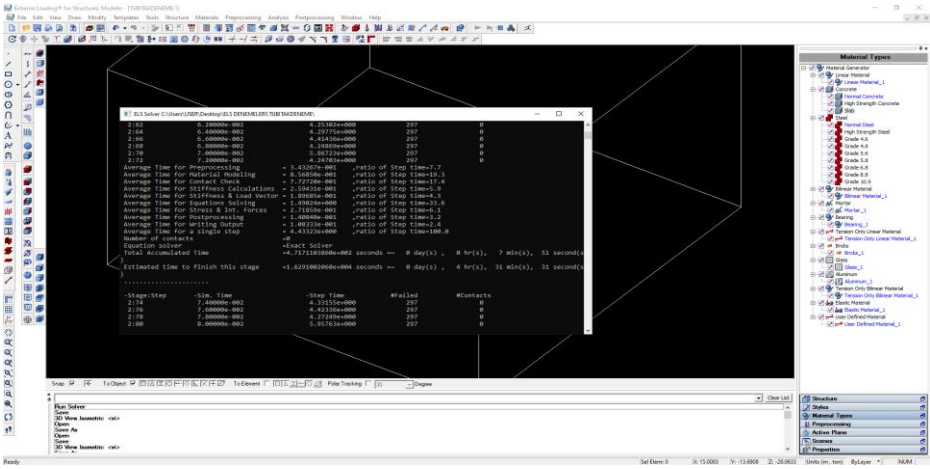
Şekil 23. '*Normal Steel'* penceresi görünümü

B420C için tüm malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra '*Uygula*' denerek '*Tamam*' seçilir ve pencere kapatılır. Artık model analize hazır hale gelmiştir. Model Şekil 24'de verilen araç çubuğunda gösterildiği gibi '*Run*' komutu tıklanarak analiz başlatılır.



Şekil 24. '*Run'* araç çubuğu

Program analiz yaparken ekranda görülen analiz işlem adımları Şekil 25'de verilmektedir. Bu model için analiz süresi yaklaşık 6-8 dakika arasında değişmektedir.



Şekil 25. Analiz ekranı

4. Sonuç

Extreme Loading for Structures yazılımı kullanılarak betonarme bir yapının modellenmesi ve aşamalı göçme analizine hazırlanmasına ilişkin işlem adımları analiz yapılana kadar sistematik biçimde ele alınmıştır. Uygulamalı Elemanlar Yöntemi esas alınarak altı katlı örnek bir betonarme yapı modeli oluşturulmuştur. Yapı geometrisinin tanımlanması, kolon, kiriş ve döşeme elemanlarının oluşturulması, malzeme ve donatı özelliklerinin belirlenmesi, ağ yapısının düzenlenmesi ve yapısal modelin tamamlanmasına ilişkin temel aşamalar açıklanmıştır. Ayrıca doğrusal olmayan dinamik analiz için gerekli yükleme senaryosu oluşturulmuş, kaldırılacak kolon tanımlanmış ve model analiz edilebilir hâle getirilmiştir.

ELS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilecek betonarme yapı modelleme ve aşamalı göçme analizlerinde izlenebilecek sıralı ve uygulamaya dönük bir işlem çerçevesi ortaya konulmuştur. Yapı geometrisi, malzeme özellikleri, ağ yapısı, yükleme senaryosu ve taşıyıcı eleman kaldırma işlemlerinin bütüncül biçimde sunulması, benzer analizleri gerçekleştirecek araştırmacı ve uygulayıcılar açısından yol gösterici niteliktedir. Bununla birlikte, kullanılan eleman boyutları, malzeme özellikleri, ağ yoğunlukları ve analiz parametreleri örnek modele özgüdür. Farklı taşıyıcı sistemler ve aşamalı göçme senaryoları için ilgili parametrelerin incelenen yapının özelliklerine ve analiz amacına uygun olarak yeniden belirlenmesi gerekmektedir.

Teşekkür

Bu kitap bölümü, TÜBİTAK 1002-A Hızlı Destek Programı kapsamında desteklenen 225M780 numaralı proje çerçevesinde hazırlanmıştır. Sağladığı destekten dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Kaynakça

Applied Science International, LLC. (2018). *Extreme Loading for Structures (ELS)* (Version 6.0) [Computer software]. Durham,

Applied Science International, LLC. (2022). *Extreme Loading for Structures V9 theoretical manual*. Durham, NC: Author. Erişim adresi: https://www.extremeloading.com/wp-content/uploads/els-v9-theoretical-manual.pdf

Cicos, C. (2025). *Konsol kiriş üstüne oturan kolonlara sahip örnek bir betonarme binanın sismik yükler altında aşamalı göçmeye karşı direncinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

Helmy, H., Salem, H., & Mourad, S. (2012). Progressive collapse assessment of framed reinforced concrete structures according to UFC guidelines for alternative path method. *Engineering Structures, 42*, 127–141. doi:10.1016/j.engstruct.2012.03.058

Kılıçer, S. (2025a). The impact of weapon systems on structural damage and progressive collapse: A case study of Belgorod Oblast. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 30*(1), 215–234. doi:10.53433/yyufbed.1511907

Kılıçer, S. (2025b). Progressive collapse analysis of a reinforced concrete structure using the enhanced local resistance (ELR) method: A comparison of UFC 4-023-03 and the Turkish Earthquake Code (TEC 2018). *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 11*(2), 513–525. doi:10.21324/dacd.1656403

Kılıçer, S., & Can, Y. (2025). Doğal afetlerin çelik yapılarda aşamalı göçme mekanizmasına etkisi: Soğuk şekillendirilmiş çelik örneği. *Cihannüma Teknoloji Fen ve Mühendislik Bilimleri Akademi Dergisi, 3*(2), 68–91. doi:10.55205/joctensa.3220241807092

Kokot, S., & Solomos, G. (2012). *Progressive collapse risk analysis: Literature survey, relevant construction standards and guidelines* (EUR 25625 EN). Luxembourg: Publications Office of the European Union. doi:10.2788/70460

Meguro, K., & Tagel-Din, H. (2000). Applied element method for structural analysis: Theory and application for linear materials. *Structural Engineering/Earthquake Engineering, JSCE, 17*(1), 21s–35s. https://doi.org/10.2208/jscej.2000.647_31

Özmen, H., Soyluk, K., & Anıl, Ö. (2018). Betonarme binaların patlayıcı kullanılarak içe yıkımında beton dayanımının yapı davranışına etkisi. *Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi B – Teorik Bilimler, 6*(Özel Sayı), 47–56. https://doi.org/10.20290/aubtdb.493268

Salem, H. M., El-Fouly, A. K., & Tagel-Din, H. S. (2011). Toward an economic design of reinforced concrete structures against progressive collapse. *Engineering Structures, 33*(12), 3341–3350. doi:10.1016/j.engstruct.2011.06.020

Shakeri, A., & Bargi, K. (2015). Use of applied element method for structural analysis. *KSCE Journal of Civil Engineering, 19*(5), 1375–1384. doi:10.1007/s12205-015-0625-4

Tagel-Din, H., & Meguro, K. (2000). Applied element method for dynamic large deformation analysis of structures. *Structural Engineering/Earthquake Engineering, JSCE, 17*(2), 215s–224s. https://doi.org/10.2208/jscej.2000.661_1

U.S. Department of Defense. (2016). *Design of buildings to resist progressive collapse* (UFC 4-023-03, Change 3). Washington, DC: Author. Retrieved from https://www.wbdg.org/FFC/DOD/UFC/ARCHIVES/ufc_4_023_03_2009_c3.pdf

U.S. General Services Administration. (2016). *GSA alternate path analysis and design guidelines for progressive collapse resistance* (Revision 1). Washington, DC: Author. Retrieved from https://www.gsa.gov/system/files/Progressive_Collapse_2016.pdf

Yüzbaşı, J. (2025). Progressive Collapse and Robustness Analysis of Steel Structures. Cukurova University Journal of the Faculty of Engineering, 40(2), 429–444.

Zümre, E. (2026). *2023 Şubat ardışık depremlerinde Malatya'da kısmen göçen binanın göçme biçiminin irdelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

BÖLÜM 13

Yapı Malzemelerinde Yumurta Kabuğu Atığının Teknik ve Çevresel Açıdan Değerlendirilmesi

Ahmet Yavuz Şahin[1]

[1] Öğr. Gör., İnş. Müh., İstanbul Gelişim Üniversitesi/İstanbul Gelişim Meslek Yüksekokulu/ İnşaat Teknolojisi, ORCID: 0000-0002-6207-1432

1 Giriş

Yapılı çevrenin iklim ve kaynak ayak izi, yalnızca binaların kullanım dönemindeki enerji tüketiminden değil, çimento, agrega, seramik, yalıtım ve diğer yapı ürünlerinin hammadde çıkarımı ile üretiminden de kaynaklanmaktadır. Çimento ve beton sektöründe süreç emisyonlarının azaltılması; klinker oranının düşürülmesi, malzeme verimliliği, alternatif bağlayıcılar ve hizmet ömrünün uzatılması gibi birbirini tamamlayan stratejiler gerektirir (Habert vd., 2020; Scrivener vd., 2018). Bu bağlamda tarımsal artıkların dolgu, lif, agrega, yakıt veya tamamlayıcı bağlayıcı bileşen olarak kullanılması, birincil kaynak talebini ve organik atıkların kontrolsüz bertarafını aynı anda azaltma potansiyeli taşır.

Tarımsal atıklar homojen bir malzeme grubu değildir. Pirinç kabuğu, şeker kamışı küspesi, buğday sapı, mısır koçanı, hindistan cevizi kabuğu, palmiye artıkları ve yumurta kabuğu; mineral bileşim, organik madde, lif geometrisi, nem, kül oluşumu ve kirlenme riski bakımından birbirinden ayrılır. Bu nedenle bir atığın 'doğal' veya 'biyolojik' olması, yapı malzemesine doğrudan uygun olduğu anlamına gelmez. Toplama düzeni, kurutma gereksinimi, kimyasal bileşim, öğütme enerjisi, sağlık güvenliği, standartlara uyum ve uzun dönemli dayanıklılık birlikte değerlendirilmelidir (Madurwar vd., 2013; Maraveas, 2020; Sangmesh vd., 2023).

Yumurta kabuğu, gıda endüstrisi ve büyük ölçekli kırma/işleme tesislerinde görece temiz, noktasal ve sürekli bir akış olarak ortaya çıkabildiği için araştırmalarda öne çıkmaktadır. Kabuğun mineral kısmı yüksek oranda kalsiyum karbonat içerir; bu özellik onu çimentolu sistemlerde öğütülmüş kireçtaşına, seramiklerde karbonat katkısına ve uygun işlemden sonra kireç esaslı ürünlere benzer bir aday haline getirir (Gautron vd., 2021; Baláž vd., 2021; Ngayakamo & Onwualu, 2022). Bununla birlikte kabuk zarı, protein kalıntısı, mikrobiyolojik yük ve değişken tane boyutu üretim öncesi kontrol edilmediğinde, depolama kokusu, organik bozunma ve ürün kararlılığı sorunları oluşabilir.

Mevcut literatürde sonuçların aktarımı sırasında üç yaygın hata görülmektedir. Birincisi, kalsiyum karbonatça zengin işlenmemiş tozun silisli-alüminli bir puzolanmış gibi sunulmasıdır. İkincisi, farklı ikame temelleri ve karışım tasarımlarından elde edilen optimum oranların tek bir genel reçeteye dönüştürülmesidir. Üçüncüsü ise atık kullanımının, taşıma ve işlem enerjisi hesaba katılmadan kendiliğinden çevresel kazanç sayılmasıdır. Oysa kalsine edilmemiş yumurta kabuğu tozunun başlıca etkileri dolgu, heterojen çekirdeklenme ve alüminat fazlarıyla karbonat tepkimeleridir; yüksek ikame düzeylerinde çimentonun azalmasına bağlı seyreltme etkisi baskın hale gelebilir (Shiferaw vd., 2019; Zhang vd., 2024).

Bu bölümün amacı, tarımsal atıkların yapı malzemelerindeki başlıca işlevlerini kısaca konumlandırmak ve yumurta kabuğu atığını kaynak potansiyeli, işleme rotaları, teknik performans, çevresel etkiler ve Türkiye'deki uygulama

koşulları bakımından güncel ve doğrulanabilir bulgularla değerlendirmektir. Çalışma sistematik derleme iddiası taşımamakta; hakemli derleme ve deneysel çalışmalar, resmi üretim verileri ve ulusal politika belgeleri üzerinden anlatı temelli eleştirel bir sentez sunmaktadır. Deneysel değerler yalnızca test koşulları açık ve kaynakla eşleştirilebilir çalışmalar için verilmiş, farklı yöntemlerden gelen sonuçlar doğrudan genellenmemiştir.

2 Tarımsal ve Gıda Endüstrisi Atıkları İçinde Yumurta Kabuğunun Konumu

2.1 Kaynak Verimliliği ve Döngüsel Ekonomi Çerçevesi

Döngüsel ekonomi yaklaşımında öncelik, artık oluşumunun önlenmesi ve gıda, yem, toprak düzenleyici veya biyokimyasal ürün gibi daha yüksek değerli kullanım seçeneklerinin korunmasıdır. Yapı malzemesine yönlendirme, gıda güvenliği veya tarımsal döngülerle rekabet etmeyen, kaçınılamayan ve teknik olarak uygun fraksiyonlar için anlamlıdır. Bu nedenle tarımsal artığın 'atık' statüsü, mevcut pazarları ve bölgesel kullanım biçimleri dikkate alınarak belirlenmelidir. Bir bölgede yakıt veya toprak iyileştirici olarak kullanılan artık, başka bir bölgede bertaraf maliyeti doğurabilir; çevresel üstünlük aynı malzeme için coğrafyaya göre değişebilir (Ganasen vd., 2023; Chen vd., 2024).

Yapı ürününe dönüşüm dört temel teknik rol üzerinden okunabilir. Silisçe zengin ve uygun sıcaklıkta yakılmış küller, reaktifliği doğrulandığında tamamlayıcı bağlayıcı malzeme olabilir. Lifli artıklar, levha ve kompozitlerde takviye veya ısı yalıtımı sağlayabilir. Sert kabuk ve çekirdekler, tane boyutu ve dayanımı uygunsa hafif agrega ya da dolgu olarak kullanılabilir. Kalsiyum karbonatça zengin yumurta kabuğu ise işleme durumuna göre mineral dolgu, karbonat kaynağı, seramik katkısı veya kalsine edilmiş kireç öncülü olabilir. Aynı artık, işlem sıcaklığı ve kimyasal dönüşüme bağlı olarak farklı işlev kazanır.

Kaynak verimliliği yalnızca atık kütlesini ürün içinde tutmakla ölçülemez. Ürünün dayanımı, su emmesi, boyutsal kararlılığı, yangın ve biyolojik dayanımı, zararlı madde salımı ve hizmet ömrü birincil ürünle karşılaştırılmalıdır. Yüksek atık içeriğine rağmen kısa ömürlü bir ürün, sık yenileme nedeniyle toplam çevresel yükü artırabilir. Yaşam döngüsü değerlendirmesinde toplama, yıkama, kurutma, öğütme, kalsinasyon, taşıma ve kaçınılan birincil hammadde açık sistem sınırlarıyla tanımlanmalıdır (Chen vd., 2024).

2.2 Başlıca Tarımsal Artıklar ve Malzeme İşlevleri

Tablo 1. Seçilmiş tarımsal artıkların yapı malzemelerindeki olası işlevleri ve kritik kontrol noktaları

Atık	Tipik ön işlem	Olası teknik işlev	Kritik kontrol noktası
Pirinç kabuğu külü	Kontrollü yakma, öğütme	Reaktif silis kaynağı; bağlayıcı veya dolgu	Yakma sıcaklığı, amorf silis, karbon kalıntısı, alkali
Şeker kamışı küspesi külü	Kurutma, kontrollü yakma, eleme-öğütme	Puzolanik katkı; hibrit bağlayıcı	Değişken kül bileşimi, kayıp karbon, tane inceliği
Tahıl sapı ve lifleri	Temizleme, boyutlandırma, yüzey işlemi	Levha/kompozit takviyesi; ısı yalıtımı	Nem, biyolojik bozunma, yangın, bağlayıcı uyumu
Hindistan cevizi ve palmiye kabukları	Kırma, sınıflandırma; gerekirse karbonlaştırma	Hafif agrega, lif veya dolgu	Su emme, şekil, organik içerik, taşıma
Mısır koçanı ve benzeri gözenekli artıklar	Kurutma, öğütme, kaplama veya ısıl işlem	Hafif dolgu ve yalıtım	Dayanım, yüksek su emme, küf ve yangın
Yumurta kabuğu	Yıkama/sanitasyon, kurutma, zar ayırma, öğütme; seçeneğe göre kalsinasyon	$CaCO_3$ esaslı dolgu ve karbonat kaynağı; seramik katkısı; kireç öncülü	Mikrobiyolojik yük, zar kalıntısı, tane dağılımı, kalsinasyon enerjisi ve CO_2

Kaynak: Madurwar vd. (2013), Maraveas (2020), Ganasen vd. (2023) ve Sangmesh vd. (2023) temelinde yazar tarafından düzenlenmiştir.

Tablo 1, aynı isim altında toplanan artıkların bile farklı işlem ve performans yollarına sahip olduğunu göstermektedir. Örneğin pirinç kabuğu külünün puzolanik etkinliği, kabuğun yakılmış olmasına değil, silisin amorf yapıda kalmasını sağlayan yanma koşullarına ve kül inceliğine bağlıdır. Benzer biçimde şeker kamışı küspesi külü, yüksek kayıp karbon veya düzensiz yanma koşullarında su gereksinimini artırabilir. Lifli artıklar düşük yoğunluk ve ısı iletkenliği açısından avantajlı olsa da alkalin çimento ortamında bozunma, nem alma ve zayıf ara yüz sorunları doğurabilir (Madurwar vd., 2013; Sangmesh vd., 2023).

Yumurta kabuğunun ayırt edici yönü, kül üretmeden de yüksek mineral içeriğe sahip olmasıdır. Bu özellik, kontrollü yıkama-kurutma ve öğütmeyle düşük sıcaklıklı bir işleme rotası kurulmasına olanak verebilir. Buna karşılık gıda

işleme dışındaki dağınık hane ve restoran kaynaklarında toplama saflığı azalır, biyolojik kalıntı ve lojistik maliyeti artar. Dolayısıyla başlangıç ölçeğinde en uygun kaynaklar; kabuğun noktasal oluştuğu yumurta kırma, pastörize yumurta ve endüstriyel gıda tesisleridir (Waheed vd., 2020).

3 Yumurta Kabuğu Atığının Kaynak Potansiyeli ve Malzeme Özellikleri

3.1 Küresel ve Türkiye Ölçeğinde Teorik Potansiyel

Yumurta kabuğu, yumurtanın yaklaşık %9-12'sini; çoğu kaynakta ise yaklaşık %10-11'ini oluşturur. Kabuğun mineral kısmı yaklaşık %95 düzeyindedir ve bu mineral fazın yaklaşık %98'i kalsiyum karbonat/kalsit olarak tanımlanmaktadır (Gautron vd., 2021; Baláž vd., 2021). Bu oranlar tür, yaş, beslenme ve ölçüm yöntemine göre değişebildiğinden kaynak potansiyeli tek bir kesin katsayıyla değil, makul bir aralıkla tahmin edilmelidir.

FAOSTAT 2024 verilerine göre dünya yumurta üretimi yaklaşık 100 milyon ton düzeyindedir (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2025). Kabuğun yaş yumurta kütlesinin %9-11'i olduğu varsayılırsa küresel teorik kabuk kütlesi yaklaşık 9-11 milyon ton/yıl düzeyindedir. Bu değer bir atık envanteri değildir: kuluçkalık kullanım, tüketim noktasındaki dağınık oluşum, nem ve organik kalıntılar ile ayrı toplama kayıpları dikkate alındığında teknik olarak erişilebilir miktar önemli ölçüde azalır. Buna rağmen ölçek, büyük yumurta işleme kümelerinde endüstriyel bir mineral kaynak potansiyeline işaret etmektedir.

Türkiye'de Tarımsal Ekonomi ve Politika Geliştirme Enstitüsü Müdürlüğü verileri yumurta üretiminin 2020-2024 döneminde yaklaşık 1,2-1,3 milyon ton/yıl bandında seyrettiğini göstermektedir (Tarımsal Ekonomi ve Politika Geliştirme Enstitüsü Müdürlüğü [TEPGE], 2025). Tablo 2'de resmi üretim değerleri, %9 ve %11 kabuk payları kullanılarak yeniden hesaplanmıştır. Yuvarlama nedeniyle küçük farklar oluşabilir; sonuçlar kuru, temiz ve toplanmış ürün miktarı değil, yaş yumurta kütlesinden türetilen üst düzey teorik göstergedir.

Tablo 2. Türkiye'de yumurta üretimi ve teorik yumurta kabuğu kütlesi, 2020-2024

Yıl	Yumurta üretimi (bin ton)	%9 kabuk varsayımı (bin ton)	%11 kabuk varsayımı (bin ton)
2020	1.237	111	136
2021	1.206	109	133
2022	1.238	111	136
2023	1.290	116	142
2024	1.244	112	137

Kaynak: Üretim verileri TEPGE'den (2025) alınmış; teorik kabuk değerleri üretim × %9 ve üretim × %11 olarak yazar tarafından hesaplanmıştır. Değerler toplanabilir atık miktarını göstermez.

2024 yılı için hesaplanan 112-137 bin ton aralığı, Türkiye'de tamamen yeni bir maden ikamesi değil, seçilmiş bölgelerde değerlendirilebilecek ikincil bir kalsiyum karbonat akışı olarak yorumlanmalıdır. En yüksek uygulanabilirlik, yumurta üretiminin ve işleme tesislerinin yoğunlaştığı bölgelerde, kabuğun başka bir kullanım için talep edilmediği ve kısa taşıma mesafesiyle işlenebildiği durumda ortaya çıkar. İl bazında yatırım kararı için tesis kaynaklı gerçek kabuk miktarı, mevsimsellik, kuru madde, zar oranı, mevcut bertaraf bedeli ve olası alıcıların talebi ayrıca ölçülmelidir.

Kütle tahmini çevresel yararın büyüklüğünü tek başına belirlemez. Bir ton kabuğun işlenmesi için su, ısı ve elektrik gereksinimi; elde edilen tozun çimento, doğal kireçtaşı unu veya başka bir girdinin ne kadarını gerçekten ikame ettiğiyle birlikte değerlendirilmelidir. Örneğin gıda tesisinden nemli çıkan kabuğun uzun mesafeye taşınması veya fosil yakıtla yüksek sıcaklıkta kalsine edilmesi, düşük dozajlı bir yapı ürünü uygulamasının çevresel kazancını azaltabilir.

3.2 Yapı Kimyasal Bileşim ve Karakterizasyon

Kuş yumurtası kabuğu, organik matriks ile düzenlenmiş hiyerarşik bir biyomineraldir. Dış kütikula, kalsit kristallerinden oluşan mineral tabakalar ve iç-dış kabuk zarları birlikte mekanik koruma ve gaz alışverişi sağlar. Yapı malzemesi uygulaması açısından belirleyici bileşen, esas olarak kalsit formundaki $CaCO_3$'tür. Bunun yanında düşük oranlarda magnezyum, fosfat ve organik madde bulunur; kesin bileşim tür, yem, yumurtlama dönemi ve analitik yönteme bağlı olarak değişir (Gautron vd., 2021).

Yumurta kabuğu tozu (YKT) için yalnızca kimyasal oksit tablosu yeterli değildir. X-ışını kırınımı ile mineral faz, termogravimetrik analizle nem-organik madde-dekarbonasyon davranışı, X-ışını floresansıyla element/oksit bileşimi, lazer kırınım veya elekle tane dağılımı, özgül yüzey alanı, yoğunluk ve mikroyapı birlikte raporlanmalıdır. Kullanım gıda kaynağından geldiği için mikrobiyolojik sanitasyon, klorür gibi yıkama kalıntıları ve zar uzaklaştırma verimi de üretim kalite planına eklenmelidir (Baláž vd., 2021; Waheed vd., 2020).

İşlenmemiş veya yalnızca kurutulup öğütülmüş kabuğun yüksek $CaCO_3$ içeriği, onu öğütülmüş kireçtaşına kimyasal olarak yaklaştırır; ancak biyojenik mikro yapı, zar kalıntıları, parçacık biçimi ve saflık nedeniyle ticari kireçtaşı unuyla eşdeğer kabul edilemez. Pliya ve Cree (2015), beyaz ve kahverengi kabuklardan üretilen tozları geleneksel kireçtaşıyla karşılaştırmış ve aynı ikame düzeyinde yumurta kabuğunun daha düşük harç performansı verebildiğini göstermiştir. Bu bulgu, yalnızca toplam $CaCO_3$ oranına bakarak ürün eşdeğerliği kurulamayacağını vurgular.

3.3 Ön İşleme ve Kalsinasyon Rotaları

Güvenilir bir YKT üretim zinciri, kaynakta ayrı toplamayla başlar. Kabuğun yabancı gıda atıkları, ambalaj, metal ve temizlik kimyasallarıyla karışması

engellenmeli; kapılı kaplarda kısa süreli depolama ve izlenebilir parti sistemi kurulmalıdır. Yıkama, yapışmış albümin ve kirleri azaltır; ısıl sanitasyon veya doğrulanmış eşdeğer işlem mikrobiyolojik riski kontrol eder. Kurutma sonrasında zarın mekanik veya pnömatik ayrılması organik içeriği düşürebilir. Bu işlemlerin hedefleri, sıcaklık-süre koşulları ve kabul kriterleri endüstriyel ölçekte standardize edilmeden laboratuvar reçetesinin üretime taşınması risklidir (Waheed vd., 2020; Ngayakamo & Onwualu, 2022).

Öğütme, dolgu ve çekirdeklenme etkisini belirleyen tane dağılımını üretir. Çok kaba parçacıklar zayıf ara yüz ve boşluk yaratabilir; aşırı ince öğütme ise elektrik tüketimini, toz kontrol gereksinimini ve su/katkı ihtiyacını artırabilir. Karşılaştırmalı çalışmalarda Blaine inceliği veya özgül yüzey alanı, medyan tane çapı ve dağılım eğrisi birlikte verilmelidir. Yalnızca '200 mikron elekten geçti' gibi bir üst sınır bilgisi, çimento boyutundaki ince fraksiyonu açıklamak için yeterli değildir (Pliya & Cree, 2015; Hamada vd., 2020).

Kalsinasyonsuz rota, $CaCO_3$ fazını büyük ölçüde korur ve yüksek sıcaklıklı dönüşümü önler. Kalsinasyon rotasında ise $CaCO_3$, yeterli sıcaklık ve bekleme süresinde CaO ile CO_2'ye ayrışır. Saf $CaCO_3$ için stokiyometrik CO_2 kütle kaybı yaklaşık %44'tür; kabuğun yaklaşık %94-97 $CaCO_3$ içerdiği kabul edildiğinde tam dekarbonasyonun kuru kabuk kütlesinin kabaca %41-43'ü düzeyinde doğrudan proses CO_2'si oluşturma potansiyeli vardır. Gerçek değer bileşim ve dönüşüm derecesine bağlıdır. Bu nedenle 'belirli bir sıcaklığın altında kalsinasyon emisyonsuzdur' ifadesi doğru değildir; enerji kaynağına ek olarak kimyasal dekarbonasyon hesaba katılmalıdır (Gautron vd., 2021; Baláž vd., 2021).

Kalsine ürün, suyla temas ettiğinde hidratasyon ve hacim değişimi gösterebilen yüksek reaktiflikte $CaO/Ca(OH)_2$ kaynağıdır. Öğütülmüş ham kabukla aynı malzeme gibi dozlanmamalı; serbest kireç, stabilite, söndürme, depolama ve iş güvenliği ayrı tasarlanmalıdır. Kalsinasyon ancak kireç fazının teknik işlevi çevresel ve ekonomik maliyeti karşılıyorsa tercih edilmelidir. Atık ısı veya yenilenebilir enerji kullanımı, kısa lojistik ve yüksek değerli ürün ikamesi bu kararı iyileştirebilir (Baláž vd., 2021; Ngayakamo & Onwualu, 2022).

4 Çimento Esaslı Malzemelerde Yumurta Kabuğu Tozu

4.1 Hidratasyon Mekanizmaları

Kalsinasyonsuz YKT'nin çimento hamurundaki davranışı, yüksek $CaCO_3$ içeriği nedeniyle kireçtaşı dolgusuna benzer üç ana mekanizmayla açıklanabilir. Birincisi fiziksel dolgu etkisidir: uygun dağılımdaki ince parçacıklar çimento taneleri arasındaki boşlukları doldurarak başlangıç paketlenmesini değiştirebilir. İkincisi heterojen çekirdeklenmedir: ince yüzeyler hidratasyon ürünlerinin çökelmesi için ek alan sağlar ve erken yaş hidratasyon hızını etkileyebilir. Üçüncüsü kimyasal karbonat etkisidir: karbonat iyonları çimentonun alüminat

fazlarıyla tepkimeye girerek hemi- ve monokarboalüminat fazlarının oluşumunu değiştirebilir (Shiferaw vd., 2019; Zhang vd., 2024).

Bu mekanizmalar, YKT'nin tek başına geleneksel anlamda puzolan olduğu sonucunu doğurmaz. Puzolanik malzeme, kalsiyum hidroksitle tepkimeye girerek bağlayıcı kalsiyum silikat/alüminat hidratları üreten yeterli reaktif silis veya alümina içermelidir. Ham yumurta kabuğunun baskın fazı $CaCO_3$'tür; bu yüzden YKT'nin doğrudan 'C-S-H üreten puzolanik katkı' olarak tanımlanması yanıltıcıdır. C-S-H oluşumu esas olarak çimento silikatlarının hidratasyonundan gelir; YKT bu süreç için yüzey sağlayabilir, fakat yüksek ikamede çimento miktarını azalttığı için toplam bağlayıcı ürün miktarı düşebilir (Nandhini & Karthikeyan, 2022; Zhang vd., 2024).

Shiferaw ve arkadaşları (2019), %10 ve %20 YKT içeren çimento hamurlarında hidratasyonun hızlandığını ve karbonat-alüminat fazlarının değiştiğini bildirmiştir. Ancak hızlanma, aynı yaşta daha yüksek nihai dayanım garantisi değildir. Zhang ve arkadaşları (2024), bağlayıcı kütlesi başına toplam ısı akışının ikameyle azaldığını; çimento gramı başına değerlendirildiğinde ise çekirdeklenme nedeniyle hidratasyonun artabildiğini göstermiştir. Bu iki normalizasyonun ayrımı önemlidir: kalan çimento daha hızlı hidrate olurken toplam çimento miktarı azaldığından sistem dayanımı gerileyebilir.

YKT'nin etkisi kullanılan çimentonun C_3A içeriği, sülfat dengesi, incelik, ikame oranı ve kür sıcaklığıyla birlikte değişir. Kireçtaşı içeren ticari çimentolarda ilave karbonatın etkisi, saf Portland çimentosundakinden farklı olabilir. Bu nedenle deney tasarımında çimentonun tam bileşimi, YKT'nin karbonat saflığı ve ikamenin 'çimento kütlesi', 'toplam bağlayıcı' veya 'hacim' esaslı olup olmadığı açıkça belirtilmelidir (Shiferaw vd., 2019; Zhang vd., 2024).

4.2 Taze Hal Özellikleri ve Karışım Tasarımı

YKT ilavesi işlenebilirliği, parçacık şekli ve özgül yüzey alanına bağlı olarak azaltabilir veya düşük dozlarda sınırlı değişim yaratabilir. İnce ve pürüzlü parçacıklar karışım suyunu fiziksel olarak tutarken, zar/organik kalıntıları köpüklenme veya hava sürüklenmesi gibi istenmeyen etkiler oluşturabilir. Aynı kıvamı korumak için su eklenmesi, su/bağlayıcı oranını yükselterek dayanım ve dayanıklılık sonuçlarını karıştırır. Bu nedenle karşılaştırmalı karışımlarda etkin su/bağlayıcı oranı sabit tutulmalı, gerekiyorsa uyumlu kimyasal katkı ile kıvam ayarlanmalı ve hava içeriği raporlanmalıdır (Hamada vd., 2020).

Yoğunluk farkı nedeniyle kütle esaslı ikame, çimentonun kapladığı hacmi aynı ölçüde korumaz. YKT'nin gerçek yoğunluğu ve nemi ölçülmeden yapılan kütle ikamesi, hamur hacmini ve agrega oranını değiştirebilir. Bu durum, özellikle yüksek ikamelerde performans kaybının yalnızca kimyasal etkiden kaynaklandığı yönünde yanlış yorumlara yol açar. Daha güvenilir yaklaşım, kontrol karışımına göre mutlak hacim hesabı yapmak ve hacim dengesini taze

yoğunluk ile hava içeriği üzerinden doğrulamaktır (Hamada vd., 2020; Yang vd., 2022).

Karışım tasarımında YKT iki farklı amaçla kullanılabilir: çimentonun bir bölümünü ikame eden mineral bileşen veya toplam katı hacmini optimize eden ek dolgu. İkame senaryosu, klinker tüketimini azaltma potansiyeli taşır fakat seyreltme riski doğurur. Ek dolgu senaryosu ise çimento içeriğini değiştirmeden paketlenmeyi iyileştirebilir; ancak birincil malzeme ikamesi sağlamıyorsa çevresel kazancı sınırlı olabilir. Çalışmalar bu iki yaklaşımı birbirinden ayırarak raporlamalıdır (Nandhini & Karthikeyan, 2022; Zhang vd., 2024).

4.3 Mekanik Performans ve Dayanıklılık

Deneysel literatür, YKT için tek bir evrensel optimum oran vermemektedir. Yerramala (2014), kendi beton sistemi içinde %5 çimento ikamesinde en uygun dayanım dengesini bildirirken; Tan, Doh ve Chin (2018) hacim esaslı ikame ve su kürü koşullarında %15 düzeyini en uygun sonuç olarak değerlendirmiştir. Buna karşılık Pliya ve Cree (2015), harçta %5 dahil yumurta kabuğu tozunun geleneksel kireçtaşı ikamesine göre daha düşük performans verdiğini göstermiştir. Bu farklılıklar çelişki değil; hammadde, incelik, ikame temeli ve kür koşullarının sonuca etkisini gösteren bağlam farklarıdır.

Zhang ve arkadaşlarının (2024) kontrol, %7,5 ve %15 YKT içeren sistemlerinde 28 günlük basınç dayanımları sırasıyla 54,8; 43,4 ve 35,5 MPa olarak raporlanmıştır. Yüksek ikameyle gözlenen düşüş, kısmen bağlayıcı seyreltmesi ve C-S-H miktarındaki azalmayla ilişkilendirilmiştir. Bu sonuç, düşük dozlarda olası dolgu/çekirdeklenme yararının yüksek dozlu çimento kaybını her zaman telafi etmediğini açıkça göstermektedir.

Su emme ve taşınım özellikleri de karışım özgüdür. Khan ve arkadaşları (2023), çimento veya kum ikamesini ayrı senaryolarda %0-15 aralığında incelemiş; kendi malzeme sistemlerinde en düşük su emmesini çimento için %5, kum için %7,5 ikamede belirlemiştir. Ancak emmedeki iyileşme, klorür geçişi, karbonatlaşma, sülfat etkisi, donma-çözülme ve asit direncinin tamamı için yeterli kanıt değildir. Tan ve arkadaşları (2018), yüksek YKT düzeylerinde asit ve sülfat ortamındaki performansın olumsuzlaşabildiğini bildirmiştir.

YKT'nin yüksek kalsiyum karbonat içeriği asidik ortamda çözünmeye duyarlıdır. Dayanıklılık değerlendirmesinde yalnızca kütle kaybı veya kısa süreli emme yerine elektriksel özdirenç, klorür göçü, karbonatlaşma derinliği, sülfat genleşmesi, donma-çözülme ve uzun dönemli mekanik özellikler birlikte ele alınmalıdır. Ayrıca YKT kaynağındaki organik kalıntı ve klorür gibi safsızlıkların donatı korozyonuna etkisi kontrol edilmelidir. Bir yapısal beton reçetesi, ilgili standart performans şartlarını sağlamadan yalnızca laboratuvar basınç dayanımına dayanarak önerilmemelidir (Sathiparan, 2021; Yang vd., 2022).

Tablo 3. Yumurta kabuğu tozunun çimento esaslı malzemelerde kullanımına ilişkin seçilmiş ve doğrulanmış deneysel bulgular

Çalışma	Malzeme ve dozaj	Öne çıkan bulgu	Yorum sınırı
Yerramala (2014)	Beton; çimento kütlesinin %5-15'i	Bu karışım sisteminde %5 en uygun dayanım dengesi; daha yüksek düzeylerde seyreltme riski	Sonuç, kullanılan çimento ve inceliğe özgüdür
Pliya ve Cree (2015)	Harç; %0, 5, 10, 15, 20 çimento ikamesi	YKT, geleneksel öğütülmüş kireçtaşına göre %5 düzeyinde dahi daha düşük performans gösterebildi	$CaCO_3$ saflığı tek başına eşdeğerlik sağlamaz
Tan vd. (2018)	Beton; hacimce %5-20; hava ve su kürü	Su kürlü kendi sistemlerinde %15 en uygun; yüksek düzeylerde asit/sülfat direnci zayıflayabildi	İkame temeli kütle değil hacimdir
Shiferaw vd. (2019)	Çimento hamuru; kütlece %10 ve %20	Çekirdeklenme/hidratasyon hızlanması ve monokarboalüminat oluşumu	Ham YKT'yi doğrudan puzolan olarak kanıtlamaz
Khan vd. (2023)	Beton; çimento veya kum için %0-15	En düşük su emmesi: çimento ikamesinde %5, kum ikamesinde %7,5	İki ikame rotası doğrudan birleştirilmemelidir
Zhang vd. (2024)	Çimento esaslı sistem; %0, 7,5 ve 15	28 günlük dayanım: 54,8; 43,4; 35,5 MPa; ikameyle belirgin seyreltme	Hidratasyon hızlanması toplam dayanım kaybını telafi etmedi
Amin vd. (2022)	%15 şeker kamışı küspesi külü + %5 nano YKT içeren hibrit sistem	Çalışmanın karışım ailesinde en iyi performans birleşimlerinden biri	Silisçe zengin kül ve $CaCO_3$ katkısının birlikte etkisidir

Kaynak: Tabloda belirtilen deneysel çalışmalar temelinde yazar tarafından düzenlenmiştir. Not: Yüzdeler çalışmaların kendi tanımlarına göre verilmiştir; kütle ve hacim esaslı ikameler birbiriyle doğrudan karşılaştırılmamalıdır. Tablo sonuçları evrensel optimum reçete anlamına gelmez.

4.4 Hibrit Bağlayıcılar ve Mühendislik Kullanım Koşulları

YKT'nin tek başına reaktif silis kaynağı olmaması, silisçe zengin tarımsal kül veya endüstriyel puzolanlarla hibrit kullanımını önemli kılar. Şeker kamışı küspesi külü, pirinç kabuğu külü, uçucu kül veya silis dumanı; uygun reaktiviteye sahipse bağlayıcı ürün oluşumuna katkı verebilir. YKT ise ince dolgu, karbonat kaynağı ve alüminat dengesini etkileyen bileşen rolü üstlenebilir. Amin ve arkadaşları (2022), %15 şeker kamışı küspesi külü ile %5 nano YKT içeren kombinasyonda kendi deney programlarının iyi performans gösteren

karışımlarından birini raporlamıştır. Bu sonuç, iki atığın her kaynak ve dozajda aynı sinerjiyi sağlayacağı anlamına gelmez.

Hibrit tasarımda her bileşenin işlevi ayrı doğrulanmalıdır. Külün amorf silis içeriği ve puzolanik reaktivitesi, YKT'nin $CaCO_3$ saflığı ve tane dağılımı, kimyasal katkı uyumu ve sülfat-karbonat dengesi test edilmelidir. Tam faktöriyel veya yanıt yüzeyi gibi deney tasarımları, yalnızca tek tek ikame serilerinden daha güvenilir optimizasyon sağlayabilir. Performans hedefi basınç dayanımıyla sınırlı tutulmamalı; işlenebilirlik, rötre, ısı gelişimi, dayanıklılık ve gömülü karbon birlikte değerlendirilmelidir (Paruthi vd., 2023).

Mühendislik uygulamasında düşük riskli ilk adım, yapısal olmayan ürünler ve kontrollü fabrika üretimidir. Kaldırım elemanı, harç, sıva veya bazı prefabrike ürünlerde parti kontrolü ve kür koşulları sahaya göre daha iyi yönetilebilir. Yapısal beton için malzeme kaynağı değişkenliği, alkali ve klorür içeriği, organik madde, hacim kararlılığı ve uzun dönem dayanıklılık doğrulanmalıdır. Ürün standardında izin verilen kireçtaşı bileşeni ile atık kökenli YKT'nin eşdeğerliği ayrıca belgelendirilmelidir; atık kökeni standart gereksinimlerini ortadan kaldırmaz (Hamada vd., 2020; Sathiparan, 2021; Yang vd., 2022).

5 Tuğla ve Seramik ile Zemin Uygulamaları

5.1 Pişmiş Kil Tuğlalar ve Seramik Karolar

Pişmiş kil sistemlerinde yumurta kabuğu, çimentolu sistemlerden farklı davranır. Isıtma sırasında organik kısım yanar, $CaCO_3$ dekarbonasyona uğrar ve oluşan CaO kil mineralleriyle yeni kalsiyumlu fazlar oluşturabilir. Gaz çıkışı gözenekliliği artırarak yoğunluk ve ısı iletkenliğini düşürebilir; fakat aşırı veya düzensiz gazlaşma su emmesini yükseltir, çatlak ve şişme oluşturabilir. İnce öğütme, homojen karıştırma, uygun ısıtma hızı ve maksimum pişirme sıcaklığı bu nedenle kritik parametrelerdir (Freire & Holanda, 2006).

Freire, Sousa ve Holanda (2008), kırmızı duvar karosu hamuruna ağırlıkça %0-15 yumurta kabuğu atığı eklemiş; %5-10 aralığında karbonatlı hammaddenin kısmi ikamesinin teknolojik özelliklerde sınırlı değişimle mümkün olabileceğini bildirmiştir. Bu sonuç, belirli bir kil-karbonat bileşimi ve pişirme programına aittir. Kabuktan gelen CaO'nun nemle sonradan hidratasyonu, yetersiz reaksiyon durumunda genleşme riski yaratabileceği için mineral faz analizi ve uzun dönem boyutsal kararlılık kontrol edilmelidir.

Tangboriboon ve arkadaşları (2019), ağırlıkça %20 yumurta kabuğu içeren kil tuğlaları 1000 °C'de beş saat pişirmiş; yaklaşık 7,0 MPa basınç dayanımı ve %15'in altında su emme raporlamıştır. Ngayakamo, Bello ve Onwualu (2020) ise %20 granit atığı ve %10 YKT içeren, 900 °C'de pişirilmiş tuğlada 3,12 MPa dayanım, 1,76 g/cm³ yoğunluk ve %12,2 su emme elde etmiştir. Farklı kil, atık bileşimi ve pişirme koşulları nedeniyle bu değerler tek bir optimuma indirgenemez; ürünün hedef kullanım sınıfı ve ilgili standardı belirleyicidir.

Seramik uygulamasının çevresel değerlendirmesi, yumurta kabuğunun atık statüsünden daha karmaşıktır. Kabuk, doğal kalsiyum karbonat girdisini azaltabilir; ancak kurutma, öğütme ve pişirme sırasında doğrudan ve enerji kaynaklı emisyonlar oluşur. Mevcut fırın prosesi içinde düşük dozda besleme ile ayrı kalsinasyon aynı çevresel profile sahip değildir. Fırın egzozu, pişme kaybı, ürün kusur oranı ve enerji tüketimi pilot ölçekte kaydedilmelidir (Ngayakamo & Onwualu, 2022).

5.2 Zemin İyileştirme ve Alkali Aktive Sistemler

YKT veya kabuktan üretilen kireç, ince taneli zeminlerin plastisite, sıkışma ve dayanım davranışını değiştirmek için araştırılmıştır. Amu, Fajobi ve Oke (2005), yumurta kabuğu tozunun kirecin genişleyen kil zemini stabilize etme potansiyeline etkisini incelemiştir. Daha güncel çalışmalarda yumurta kabuğu kökenli kirecin teknik ve çevresel performansı değerlendirilmiştir (Saldanha vd., 2021). Burada ham $CaCO_3$ tozu ile kalsine/söndürülmüş kireç aynı bağlayıcı değildir; reaksiyon hızı, güvenlik ve karbon ayak izi uygulanan dönüşüme göre değişir.

Zemin uygulamalarında şişme basıncı, plastisite indisi, serbest basınç dayanımı ve Kaliforniya taşıma oranı gibi kısa dönem göstergelerin yanında ıslanma-kuruma, donma-çözülme, sülfatlı zemin uyumu ve yeraltı suyu etkisi incelenmelidir. Kireç üretimi için kalsinasyon yapılacaksa dekarbonasyon CO_2'si ve yakıt tüketimi, doğal kireçle karşılaştırmalı yaşam döngüsü sınırına dahil edilmelidir. Yerel kabuğun uzak doğal kireç kaynağını ikame ettiği bir senaryo, kabuğun uzun mesafeye taşındığı senaryodan farklı sonuç verebilir (Saldanha vd., 2021).

Alkali aktive malzemelerde yumurta kabuğu, kalsiyum katkısı, dolgu veya kalsine ürün olarak kullanılabilir; ancak yüksek performans için silis ve alümina içeren ana öncülün kimyası belirleyicidir. Kabuk, tek başına düşük silis içeriği nedeniyle tipik bir jeopolimer öncülü değildir. Kullanım, uçucu kül, cüruf veya reaktif tarımsal külle birlikte ve aktivatör tüketimi, alkalinite, büzülme ile dayanıklılık değerlendirilerek tasarlanmalıdır (Sathiparan, 2021; Yang vd., 2022).

YKT ayrıca polimer kompozit, dolgu, kalsiyum kaynağı, adsorban ve biyomalzeme gibi yapı sektörü dışındaki yüksek değerli ürünlerde de değerlendirilmektedir (Baláž vd., 2021; Waheed vd., 2020). Kaynak tahsisinde yalnızca tonaj değil, ürün değeri ve çevresel fayda dikkate alınmalıdır. Daha yüksek değerli bir kullanımın yerel olarak mevcut olduğu durumda kabuğun düşük oranlı mineral dolguya yönlendirilmesi döngüsellik açısından en iyi seçenek olmayabilir.

6 Çevresel ve Ekonomik Değerlendirme

6.1 Yaşam Döngüsü Sınırları ve Karbon Dengesi

Bir YKT ürününün çevresel performansı en az iki karşılaştırmalı senaryo gerektirir: kabuğun mevcut yönetim biçimi ve kabuğun yapı ürününe dönüştürülmesi. Mevcut durumda kabuk düzenli depolama, kompostlama, yem/mineral ürünü veya başka bir sanayi girdisi olarak kullanılıyorsa kaçınılan yükler farklıdır. Yeni senaryoda toplama, soğuk veya sıcak yıkama, sanitasyon, kurutma, zar ayırma, öğütme, taşıma, depolama ve ürün üretimi hesaba katılmalıdır. Atık kabul edilen kabuğa sıfır çevresel yük atamak, önceki üretim zincirinin tamamını ürüne yüklemek kadar sonuçları etkileyen bir tahsis kararıdır.

En önemli kazanım mekanizması, gerçekten ikame edilen birincil girdidir. YKT çimentoyu ikame ediyor fakat aynı dayanım ve hizmet ömrü için daha fazla bağlayıcı veya daha kalın eleman gerektiriyorsa nominal ikame oranı gerçek klinker tasarrufunu yansıtmaz. Doğal kireçtaşı unu ikame ediliyorsa kaçınılan taş ocağı ve öğütme yükü, klinker ikamesinden daha düşüktür. Seramikte doğal karbonat azalırken fırın dekarbonasyonu devam edebilir. Bu nedenle fonksiyonel birim yalnızca '1 kg atık kullanımı' değil, örneğin hedef dayanım ve hizmet ömrünü sağlayan 1 m^3 beton veya 1 m^2 duvar ürünü olmalıdır (Habert vd., 2020; Chen vd., 2024).

Kalsinasyon kararı karbon açısından özellikle kritiktir. $CaCO_3$'ün CaO'ya dönüşümü, enerji kaynağından bağımsız olarak doğrudan proses CO_2'si üretir. Yenilenebilir elektrik veya atık ısı yakıt emisyonunu azaltabilir, fakat dekarbonasyon emisyonunu ortadan kaldırmaz. Kalsine ürün hizmet sırasında yeniden karbonatlaşarak CO_2'nin bir bölümünü geri alabilir; bu tutulumun hızı ve miktarı ürün geometrisi, nem, CO_2 erişimi ve ömür sonu işlemine bağlı olduğundan varsayım yerine ölçüm veya uygun model gerekir (Baláž vd., 2021; Ngayakamo & Onwualu, 2022).

Ham ve ince öğütülmüş YKT, kalsinasyona göre daha düşük sıcaklık gerektirdiği için dolgu uygulamalarında başlangıçta daha düşük enerjili bir rota olabilir. Bununla birlikte yüksek nemli kabuğun kurutulması ve çok ince öğütme önemli miktarda enerji tüketebilir. Bölgesel kümelenme, gıda tesisinin atık ısısından yararlanma ve kısa taşıma mesafesi çevresel performansı iyileştirir. Yaşam döngüsü çalışmaları elektrik karışımı, taşıma, nem ve ikame edilen ürün varsayımlarını duyarlılık analiziyle sınamalıdır (Chen vd., 2024; Ngayakamo & Onwualu, 2022).

6.2 Ekonomik Ölçek ve Kalite Güvencesi

Ekonomik uygulanabilirlik, kabuğun negatif maliyetli bir atık olduğu varsayımına indirgenemez. Kaynak ayırma, kapalı depolama, gıda hijyeni, su ve atıksu yönetimi, kurutma, öğütme, toz toplama, laboratuvar analizi, ambalaj ve taşıma düzenli maliyet kalemleridir. Buna karşılık bertaraf bedelinden kaçınma,

doğal mineral veya klinker tasarrufu ve düşük karbonlu ürün primi gelir yaratabilir. Noktasal ve sürekli kabuk kaynağı birim maliyeti düşürürken dağınık hane toplaması lojistiği pahalılaştırır.

Pazarın sürdürülebilir olması için ürün spesifikasyonu gerekir. Kaynak ve parti kodu, nem, organik madde, $CaCO_3$ içeriği, klorür, tane dağılımı, özgül yüzey, yoğunluk ve mikrobiyolojik kabul kriterleri tanımlanmalıdır. Kalsine üründe serbest CaO, sönme davranışı ve hacim kararlılığı ayrıca kontrol edilmelidir. Beton veya seramik üreticisi, her sevkiyatta değişen bir tozu reçeteye güvenle dahil edemez; değişkenliğin istatistiksel süreç kontrolüyle sınırlandırılması gerekir.

Laboratuvar ölçeğinde elde edilen olumlu sonuç, endüstriyel üretimde doğrudan tekrarlanmayabilir. Değirmen tipi, öğütme kapasitesi, zar ayrımı, bekleme süresi ve toplu depolama aglomerasyonu parçacık davranışını değiştirir. Ölçek büyütme sırası, kaynak karakterizasyonu, pilot ön işleme, küçük ürün serisi, gerçek üretim hattı denemesi, üçüncü taraf deneyleri ve saha izleme şeklinde ilerlemelidir. Başarısız veya sınırlı sonuçların kayıt altına alınması, yalnızca başarılı reçetelerin yayımlandığı seçilim yanlılığını azaltır.

7 Türkiye İçin Uygulama Potansiyeli ve Yol Haritası

7.1 Mevzuat ve Stratejik Uyum

Türkiye'de Sıfır Atık Yönetmeliği atıkların önlenmesi, azaltılması, yeniden kullanımı ve geri kazanımı için genel yönetim çerçevesi sunmaktadır (Sıfır Atık Yönetmeliği, 2019). 2025-2028 Ulusal Döngüsel Ekonomi Stratejisi ve Eylem Planı ise kaynak verimliliği, ikincil hammadde kullanımı, ürün politikaları ve sanayi dönüşümünü bütünleştiren daha geniş bir yönelim ortaya koymaktadır (Cumhurbaşkanlığı Genelgesi 2025/17, 2025). Yumurta kabuğunun yapı ürününde kullanımı bu hedeflerle uyumludur; ancak atığın ürün veya yan ürün statüsü, gıda kaynaklı hijyen yükümlülükleri ve yapı ürününün teknik uygunluğu ayrı mevzuat başlıklarıdır.

Uygulama için iki kalite eşiği kurulmalıdır. İlk eşik, kabuğun güvenli ve tutarlı bir ikincil hammaddeye dönüşmesidir; toplama ve işleme tesisi bu aşamadan sorumludur. İkinci eşik, YKT içeren nihai yapı ürününün amaçlanan kullanım için standart performansı sağlamasıdır; beton, tuğla veya seramik üreticisi bu aşamada sorumludur. Atığın analiz edilmesi, nihai ürün belgelendirmesinin; nihai ürün deneyleri de girdi izlenebilirliğinin yerini tutmaz.

Kamu alımları ve pilot projeler, erken pazar oluşturabilir; ancak teknik gereklilikler atık içeriği uğruna zayıflatılmamalıdır. Şartnamelerde yalnızca asgari atık yüzdesi yerine doğrulanmış yaşam döngüsü etkisi, ürün performansı, izlenebilirlik ve yerel kaynak ölçütleri birlikte kullanılabilir. Üniversite, yumurta işleme sanayisi, çimento/seramik üreticisi, belediye ve akredite laboratuvar ortaklığı bölgesel pilotların başarısını yükseltir.

7.2 Teknik Kurumsal ve Lojistik Zorluklar

Birinci zorluk kaynak saflığıdır. Evsel kabuklar diğer gıda atıklarıyla karışırken, endüstriyel tesis kabukları daha homojen fakat yüksek nemli olabilir. Membran ve protein kalıntısı, depolama süresi uzadıkça koku ve mikrobiyolojik risk yaratır. Toplama sözleşmesi, izin verilen yabancı madde oranı, maksimum bekleme süresi, sıcaklık ve kap temizliği gibi operasyonel kriterler içermelidir.

İkinci zorluk teknik değişkenliktir. Kümes hayvanı türü, yem, kabuk rengi ve üretim koşulları bileşimi sınırlı ölçüde değiştirir; asıl büyük fark ön işleme ve öğütmeden doğar. Çalışmaların bir kısmında zar ayırma, gerçek incelik veya ikame hacmi açıklanmadığı için sonuçların tekrarlanabilirliği düşüktür. Ulusal bir teknik kılavuz, numune alma, karakterizasyon ve raporlama için asgari veri seti tanımlamalıdır.

Üçüncü zorluk ekonomik ölçektir. YKT, çimentoda çoğu kez düşük yüzdede kullanılacağından tek bir beton tesisinin talebi sınırlı kalabilir; buna karşılık tek bir büyük yumurta işleme tesisi düzenli akış sağlayabilir. Bölgesel işleme merkezi, birden fazla gıda üreticisinin kabuğunu kabul edip farklı incelik sınıflarında ürün sunabilir. Bununla birlikte taşıma mesafesi arttıkça nemli kabuğun maliyeti ve emisyonu hızla yükselir. Yer seçimi gerçek arz-talep ve ton-kilometre analiziyle yapılmalıdır.

Dördüncü zorluk pazar güvenidir. 'Atıktan yapılmış' ürün algısı, belgesiz uygulamalarla hızla zarar görebilir. Bağımsız deney, ürün etiketi, parti izlenebilirliği ve uzun dönemli saha performansı açıkça paylaşılmalıdır. Tasarımcı ve yüklenici için yapısal olmayan ürün, belirli maruziyet sınıfı veya azami ikame gibi kullanım sınırları net tanımlanmalıdır.

7.3 Aşamalı Uygulama Modeli

İlk aşama bölgesel envanterdir. Yumurta üretim istatistiklerinden yapılan teorik hesap, yatırım kararına yalnızca başlangıç sağlar. İşleme tesisleri bazında aylık kabuk miktarı, nem, zar ve yabancı madde oranı, mevcut yönetim maliyeti ve taşıma rotası en az bir yıl izlenmelidir. Aynı bölgede doğal kireçtaşı, çimento, seramik veya tuğla üreticilerinin talebi ve kalite koşulları belirlenmelidir.

İkinci aşama, iki farklı ürün rotasının pilot karşılaştırmasıdır: kalsinasyonsuz ince YKT ve gerekçesi varsa kalsine/söndürülmüş ürün. Her rota için kütle ve enerji dengesi, su tüketimi, atıksu, emisyon, ürün verimi ve maliyet kaydedilmelidir. Çimento esaslı pilotlarda %5 gibi düşük bir başlangıç oranı sabit reçete olarak değil, test matrisi başlangıç noktası olarak ele alınmalı; kontrol, düşük ve orta ikame serileri eş hacim, eş kıvam ve uygun kür koşullarında karşılaştırılmalıdır.

Üçüncü aşama ürün doğrulamasıdır. Yapısal olmayan prefabrike eleman, harç veya seramik gibi seçilmiş uygulamada ilgili standart deneyler, dayanıklılık,

hacim kararlılığı ve gerekli çevresel salım testleri uygulanmalıdır. Üretim değişkenliği için en az birkaç bağımsız parti test edilmeli, yalnızca tek laboratuvar harmanı üzerinden karar verilmemelidir. Yaşam döngüsü ve maliyet hesabı laboratuvar varsayımları yerine pilot verilerle güncellenmelidir.

Dördüncü aşama kontrollü saha uygulaması ve izleme olmalıdır. Ürün kimliği, kabuk kaynağı, işleme partisi, reçete, kür ve uygulama koşulları dijital kayıtla ilişkilendirilmeli; çatlak, su emme, yüzey bozulması ve diğer işlevsel göstergeler belirli aralıklarla takip edilmelidir. Başarılı sonuçların ardından standardizasyon ve ölçek büyütme yapılmalı; kaynak veya proses önemli ölçüde değiştiğinde yeniden uygunluk değerlendirilmelidir.

Tablo 4. Türkiye'de yumurta kabuğu temelli yapı malzemesi için önerilen karar ve doğrulama çerçevesi

Aşama	Asgari kanıt	Karar çıktısı
1. Kaynak envanteri	Tesis bazlı miktar, nem, zar/yabancı madde, mevsimsellik, mevcut maliyet	En az 12 aylık doğrulanmış veri ve uygun toplama havzası
2. İkincil hammadde	Sanitasyon, öğütme/kalsinasyon, $CaCO_3$, organik madde, klorür, incelik, enerji	Tekrarlanabilir YKT sınıfı ve parti izlenebilirliği
3. Karışım tasarımı	Eş hacim, sabit etkin su/bağlayıcı, kıvam, hava, kontrol serisi	İstatistiksel olarak anlamlı performans aralığı; evrensel optimum iddiası yok
4. Ürün uygunluğu	İlgili standart dayanım, su emme, dayanıklılık, kararlılık ve gerekirse salım	Amaçlanan kullanım sınıfına uygunluk
5. Sürdürülebilirlik	Yaşam döngüsü, ton-km, enerji, su, dekarbonasyon CO_2'si, hizmet ömrü, maliyet	Kontrol ürününe göre doğrulanmış net fayda
6. Saha ve ölçek büyütme	Birden çok üretim partisi, pilot saha, uzun dönem izleme, değişiklik yönetimi	Ticari üretim için kalite planı ve yeniden doğrulama koşulları

Kaynak: Bölümde sentezlenen teknik ve çevresel bulgular temelinde yazar tarafından oluşturulmuştur.

8 Sonuç

Tarımsal artıkların yapı malzemelerinde kullanımı, atık bertarafını azaltma ve birincil hammadde tüketimini sınırlama potansiyeline sahiptir; ancak bu potansiyel her artık ve işlem için otomatik bir çevresel üstünlük anlamına gelmez. Lif, kül, kabuk ve biyojenik mineral kaynakları farklı teknik işlevlere sahiptir.

Malzemenin kökeninden çok, kimyasal-mineralojik niteliği, işlem gereksinimi, ürün performansı, hizmet ömrü ve yerel değer zinciri belirleyicidir.

Yumurta kabuğu, mineral kısmı büyük ölçüde kalsitten oluşan dikkat çekici bir biyojenik $CaCO_3$ kaynağıdır. Türkiye'nin 2024 yumurta üretimi üzerinden hesaplanan 112-137 bin ton/yıl teorik kabuk aralığı, özellikle endüstriyel yumurta işleme kümelerinde kayda değer bir potansiyel gösterir. Bununla birlikte bu miktar toplanabilir kuru ürün değildir; gerçek arz için tesis bazlı saflık, nem, mevcut kullanım ve lojistik ölçülmelidir.

Bilimsel mekanizma bakımından en önemli düzeltme, kalsinasyonsuz YKT'nin doğrudan puzolan olarak adlandırılmamasıdır. İnce YKT çimento sisteminde dolgu, çekirdeklenme ve karbonat-alüminat etkileşimi sağlayabilir; fakat yüksek ikamelerde klinker/çimento azalmasına bağlı seyreltme çoğunlukla baskın hale gelir. Çalışmalar arasında bildirilen %5, %10 veya %15 gibi 'optimum' değerler farklı kütle-hacim temelleri, incelik, çimento ve kür koşullarına bağlıdır. Genel bir reçete yerine performans temelli, kaynak ve ürün özelinde doğrulama gereklidir.

Kalsinasyon, kabuğu CaO kaynağına dönüştürerek seramik, zemin veya özel bağlayıcı uygulamalarında yeni işlevler sağlayabilir; ancak yüksek sıcaklık enerjisi ve $CaCO_3$'ün dekarbonasyonundan doğan proses CO_2'si hesaba katılmalıdır. Kalsinasyonsuz rota genellikle daha düşük sıcaklıklı bir başlangıç seçeneğidir; yine de yıkama, kurutma ve ince öğütmenin enerji-su yükleri yaşam döngüsü sınırına dahildir.

Tuğla ve seramik çalışmalarında yumurta kabuğunun gözenek, yoğunluk ve faz oluşumunu değiştirebildiği; uygun bileşim ve pişirme koşullarında teknik olarak kullanılabilir ürünler üretilebildiği görülmektedir. Ancak gözenek artışı su emme ve dayanımı, serbest kireç ise hacim kararlılığını olumsuz etkileyebilir. Zemin iyileştirmede ham YKT ile kabuktan üretilen kireç ayrılmalı; dayanıklılık ve çevresel etkiler uzun dönemli olarak doğrulanmalıdır.

Mevcut kanıtların önemli bir bölümü laboratuvar ölçeğindeki kısa süreli deneylere dayanmaktadır. Kaynak ve parti değişkenliği, uzun dönem dayanıklılık, tam ölçekli üretim, saha performansı ve karşılaştırmalı yaşam döngüsü analizi konularında veri eksikleri sürmektedir. Bu nedenle olumlu laboratuvar sonuçları, ticari uygulama için tek başına yeterli kanıt sayılmamalıdır (Sathiparan, 2021; Yang vd., 2022; Ngayakamo & Onwualu, 2022).

Türkiye'de uygulanabilir bir model; endüstriyel kaynakta ayrı toplama, doğrulanmış sanitasyon, standart YKT sınıfları, bölgesel kısa lojistik, çok partili ürün deneyi, yaşam döngüsü ve maliyet analizi ile kontrollü saha izlemesini bir araya getirmelidir. Kamu alımı ve pilot projeler pazar oluşturabilir; fakat atık içeriği performans ve güvenlik gereksinimlerinin yerini almamalıdır. Bu koşullar

sağlandığında yumurta kabuğu, bertaraf edilmesi gereken gıda sanayisi artığından izlenebilir ve değerli bir ikincil mineral girdiye dönüşebilir.

Kaynakça

Amin, M., Attia, M. M., Agwa, I. S., Elsakhawy, Y., El-Hassan, K. A., & Abdelsalam, B. A. (2022). Effects of sugarcane bagasse ash and nano eggshell powder on high-strength concrete properties. *Case Studies in Construction Materials, 17*, e01528. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01528

Amu, O. O., Fajobi, A. B., & Oke, B. O. (2005). Effect of eggshell powder on the stabilizing potential of lime on an expansive clay soil. *Journal of Applied Sciences, 5*(8), 1474-1478. https://doi.org/10.3923/jas.2005.1474.1478

Baláž, M., Boldyreva, E. V., Rybin, D., Pavlović, S., Rodríguez-Padrón, D., Mudrinić, T., & Luque, R. (2021). State-of-the-art of eggshell waste in materials science: Recent advances in catalysis, pharmaceutical applications, and mechanochemistry. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 8*, 612567. https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.612567

Chen, L., Yang, M., Chen, Z., Xie, Z., Huang, L., Osman, A. I., Farghali, M., Sandanayake, M., Liu, E., Ahn, Y. H., Al-Muhtaseb, A. H., Rooney, D. W., & Yap, P.-S. (2024). Conversion of waste into sustainable construction materials: A review of recent developments and prospects. *Materials Today Sustainability, 27*, 100930. https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100930

Cumhurbaşkanlığı Genelgesi 2025/17. (2025, 18 Ekim). Ulusal Döngüsel Ekonomi Stratejisi ve Eylem Planı (2025-2028). Resmi Gazete (Sayı: 33051). https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2025/10/20251018-18.pdf

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2025). Production: Crops and livestock products [Data set]. FAOSTAT. 18 Eylül 2026 tarihinde https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL adresinden alındı.

Freire, M. N., & Holanda, J. N. F. (2006). Characterization of avian eggshell waste aiming its use in a ceramic wall tile paste. *Ceramica, 52*(324), 240-244. https://doi.org/10.1590/S0366-69132006000400004

Freire, M. N., Sousa, S. J. G., & Holanda, J. N. F. (2008). Using eggshell waste in red wall tiles. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management, 161*(1), 23-27. https://doi.org/10.1680/warm.2008.161.1.23

Ganasen, N., Bahrami, A., & Loganathan, K. (2023). A scientometric analysis review on agricultural wastes used as building materials. *Buildings, 13*(2), 426. https://doi.org/10.3390/buildings13020426

Gautron, J., Stapane, L., Le Roy, N., Nys, Y., Rodriguez-Navarro, A. B., & Hincke, M. T. (2021). Avian eggshell biomineralization: An update on its structure, mineralogy and protein tool kit. *BMC Molecular and Cell Biology, 22*, 11. https://doi.org/10.1186/s12860-021-00350-0

Habert, G., Miller, S. A., John, V. M., Provis, J. L., Favier, A., Horvath, A., & Scrivener, K. L. (2020). Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nature Reviews Earth & Environment, 1*, 559-573. https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3

Hamada, H. M., Tayeh, B. A., Al-Attar, A., Yahaya, F. M., Muthusamy, K., & Humada, A. M. (2020). The present state of the use of eggshell powder in concrete: A review. *Journal of Building Engineering, 32*, 101583. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101583

Khan, K., Ahmad, W., Amin, M. N., & Deifalla, A. F. (2023). Investigating the feasibility of using waste eggshells in cement-based materials for sustainable construction. *Journal of Materials Research and Technology, 23*, 4059-4074. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.057

Madurwar, M. V., Ralegaonkar, R. V., & Mandavgane, S. A. (2013). Application of agro-waste for sustainable construction materials: A review. *Construction and Building Materials, 38*, 872-878. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.011

Maraveas, C. (2020). Production of sustainable construction materials using agro-wastes. *Materials, 13*(2), 262. https://doi.org/10.3390/ma13020262

Nandhini, K., & Karthikeyan, J. (2022). Sustainable and greener concrete production by utilizing waste eggshell powder as cementitious material: A review. *Construction and Building Materials, 335*, 127482. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127482

Ngayakamo, B. H., Bello, A., & Onwualu, A. P. (2020). Development of eco-friendly fired clay bricks incorporated with granite and eggshell wastes. *Environmental Challenges, 1*, 100006. https://doi.org/10.1016/j.envc.2020.100006

Ngayakamo, B., & Onwualu, A. P. (2022). Recent advances in green processing technologies for valorisation of eggshell waste for sustainable construction materials. *Heliyon, 8*(6), e09649. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09649

Paruthi, S., Khan, A. H., Kumar, A., Kumar, F., Hasan, M. A., Magbool, H. M., & Manzar, M. S. (2023). Sustainable cement replacement using waste eggshells: A review on mechanical properties of eggshell concrete and strength prediction using artificial neural network. *Case Studies in Construction Materials, 18*, e02160. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02160

Pliya, P., & Cree, D. (2015). Limestone derived eggshell powder as a replacement in Portland cement mortar. *Construction and Building Materials, 95*, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.103

Saldanha, R. B., da Rocha, C. G., Caicedo, A. M. L., & Consoli, N. C. (2021). Technical and environmental performance of eggshell lime for soil stabilization. *Construction and Building Materials, 298*, 123648. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123648

Sangmesh, B., Patil, N., Jaiswal, K. K., Gowrishankar, T. P., Selvakumar, K. K., Jyothi, M. S., Jyothilakshmi, R., & Kumar, S. (2023). Development of sustainable alternative materials for the construction of green buildings using agricultural residues: A review. *Construction and Building Materials, 368*, 130457. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130457

Sathiparan, N. (2021). Utilization prospects of eggshell powder in sustainable construction material: A review. *Construction and Building Materials, 293*, 123465. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123465

Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO_2 cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research, 114*, 2-26. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015

Shiferaw, N., Habte, L., Thenepalli, T., & Ahn, J. W. (2019). Effect of eggshell powder on the hydration of cement paste. *Materials, 12*(15), 2483. https://doi.org/10.3390/ma12152483

Sıfır Atık Yönetmeliği. (2019, 12 Temmuz). Resmi Gazete (Sayı: 30829). https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2019/07/20190712-9.htm

Tan, Y. Y., Doh, S. I., & Chin, S. C. (2018). Eggshell as a partial cement replacement in concrete development. *Magazine of Concrete Research, 70*(13), 662-670. https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00003

Tangboriboon, N., Moonsri, S., Netthip, A., Sangwan, W., & Sirivat, A. (2019). Enhancing physical-thermal-mechanical properties of fired clay bricks by eggshell as a bio-filler and flux. *Science of Sintering, 51*(1), 1-13. https://doi.org/10.2298/SOS1901001T

Tarımsal Ekonomi ve Politika Geliştirme Enstitüsü Müdürlüğü (TEPGE). (2025). Tarım ürünleri piyasaları: Yumurta (Temmuz 2025). T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı. https://arastirma.tarimorman.gov.tr/tepge

Waheed, M., Yousaf, M., Shehzad, A., Inam-Ur-Raheem, M., Khan, M. K. I., Khan, M. R., Ahmad, N., Abdullah, & Aadil, R. M. (2020). Channelling eggshell waste to valuable and utilizable products: A comprehensive review. *Trends in Food Science & Technology, 106*, 78-90. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.10.009

Yang, D., Zhao, J., Ahmad, W., Amin, M. N., Aslam, F., Khan, K., & Ahmad, A. (2022). Potential use of waste eggshells in cement-based materials: A bibliographic analysis and review of the material properties. *Construction*

and Building Materials, 344, 128143. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128143

Yerramala, A. (2014). Properties of concrete with eggshell powder as cement replacement. Indian Concrete Journal, 88(10), 94-105.

Zhang, G.-Y., Oh, S., Han, Y., Meng, L.-Y., Lin, R., & Wang, X.-Y. (2024). Influence of eggshell powder on the properties of cement-based materials. *Materials, 17*(7), 1705. https://doi.org/10.3390/ma17071705

BÖLÜM 14

Biyomedikal Uygulamalarda Biyoseramikler: Güncel Gelişmeler ve Gelecek Perspektifleri

Nurcan Çalış Açıkbaş[1]
Gökhan Açıkbaş[2]

[1] Prof. Dr., Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0001-6193-8252
[2] Prof. Dr., Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-5695-3658

1. GİRİŞ

Biyoseramikler, biyouyumlulukları, biyoaktiviteleri, osteokondüktif özellikleri ve kimyasal kararlılıkları sayesinde günümüzde biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılan ileri biyomalzemeler arasında yer almaktadır. Özellikle ortopedi, diş hekimliği, kraniyofasiyal cerrahi ve doku mühendisliği alanlarında kemik ve sert doku onarımına yönelik önemli çözümler sunmaktadırlar. Son yıllarda nanoteknoloji, eklemeli imalat (3D baskı), yüzey modifikasyonu ve kompozit biyomalzeme teknolojilerindeki gelişmeler, biyoseramiklerin biyolojik performansını ve klinik etkinliğini önemli ölçüde artırmıştır. Özellikle nano-yapılı biyoseramikler, iyon salınımı ile doku rejenerasyonunu teşvik eden biyoaktif sistemler ve kontrollü ilaç salımına olanak sağlayan fonksiyonel biyoseramik platformları, araştırmaların odak noktası haline gelmiştir. Ayrıca yapay zekâ destekli malzeme tasarımı ve hasta spesifik üretim yaklaşımları, biyoseramik tabanlı implantların kişiselleştirilmesine yönelik yeni fırsatlar sunmaktadır.

Bu bölümde biyoseramiklerin temel sınıflandırılması, yapısal ve biyolojik özellikleri, biyomedikal uygulama alanları ve son yıllarda ortaya çıkan yenilikçi teknolojiler kapsamlı olarak ele alınmaktadır. Sonuç olarak, biyoseramiklerin rejeneratif tıp ve kişiselleştirilmiş sağlık teknolojilerindeki rolünün giderek artacağı ve gelecek nesil biyomalzemelerin geliştirilmesinde önemli bir yer tutacağı öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Biyoseramikler; Biyomalzemeler; Biyouyumluluk; Kemik doku mühendisliği; Rejeneratif tıp; Biyomedikal uygulamalar.

2. BİYOSERAMİKLERE GENEL BAKIŞ

Biyoseramik terimi, kas-iskelet sisteminin hastalıklı veya hasarlı dokularının onarımı ve yeniden yapılandırılması için tıbbi implantasyonda kullanılan seramik malzeme sınıfını ifade eder [1].

Seramik malzemelerin büyük çoğunluğu polikristalin yapıya sahip olup yüksek sertlik, yüksek basma dayanımı, aşınma direnci, korozyon direnci ve düşük yoğunluk gibi avantajlı özellikler sergilemektedir. Bununla birlikte, kırılgan yapıları nedeniyle çekme yükleri altında sınırlı performans göstermekte, buna karşın basma yüklerine karşı oldukça yüksek dayanım sunmaktadırlar [2]. Ayrıca seramikler genellikle termal ve elektriksel yalıtkan özellik gösterirler ve bu özellikleri sayesinde ortopedi, diş hekimliği, kraniyofasiyal cerrahi, implant teknolojileri ve biyosensör uygulamaları gibi birçok alanda kullanım alanı bulmaktadırlar [3-6].

Biyolojik ortamla etkileşim biçimlerine göre biyoseramikler genel olarak biyoaktif, biyoinert ve biyorezorbe olabilen (biyobozunur) olmak üzere üç temel grupta sınıflandırılmaktadır [7].

2.1. Biyoseramiklerin Sınıflandırılması

2.1.1. Biyoaktif Biyoseramikler

Biyoaktif biyoseramikler, implantasyon sonrasında çevreleyen biyolojik dokularla doğrudan etkileşime girerek kemik dokusuyla güçlü bir ara yüzey bağı oluşturabilen malzemelerdir. Bu malzemelerin en önemli özelliği, implant yüzeyinde zamanla biyolojik olarak aktif bir apatit tabakasının oluşmasını sağlayarak kemik dokusunun implant yüzeyine bağlanmasını teşvik etmeleridir [8,9].

Biyoaktivite mekanizması, implant yüzeyi ile çevresindeki vücut sıvıları arasında gerçekleşen iyon değişim reaksiyonları sonucunda ortaya çıkmaktadır. Bu süreçte implant yüzeyinde, doğal kemik mineral fazına kimyasal ve kristalografik açıdan oldukça benzer olan karbonatlı hidroksiapatit (CHAp) tabakası oluşur. Oluşan bu biyolojik ara yüzey, osteoblast aktivitesini destekleyerek yeni kemik oluşumunu teşvik eder ve implantın osseointegrasyonunu hızlandırır [10].

Biyoaktif biyoseramiklerin en yaygın örnekleri arasında sentetik hidroksiapatit (HA; $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$), trikalsiyum fosfat (TCP), biyocamlar ve cam-seramikler yer almaktadır. Özellikle hidroksiapatit ve kalsiyum fosfat esaslı biyoseramikler, kimyasal bileşimlerinin doğal kemik mineraline benzer olması nedeniyle kemik rejenerasyonu uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [9].

2.1.2. Biyoinert Biyoseramikler

Biyoinert biyomalzemeler, implantasyon sonrasında çevreleyen biyolojik dokularla minimum düzeyde etkileşim gösteren ve biyolojik ortamda yüksek kimyasal kararlılık sergileyen malzemelerdir. Bu malzemeler kemik dokusuyla doğrudan kimyasal bağ oluşturmazlar. Bunun yerine implant yüzeyi ile çevreleyen doku arasında ince bir fibröz bağ dokusu tabakası meydana gelir [11]. Bu nedenle biyoinert malzemelerin biyolojik başarısı, doğrudan biyoaktiviteden ziyade mekanik stabilite ve uzun dönem biyouyumluluğa bağlıdır. Biyoinert biyoseramikler yüksek aşınma direnci ve üstün mekanik özellikleri sayesinde özellikle yük taşıyan ortopedik implantlarda tercih edilmektedir [12, 13].

Başlıca biyoinert biyoseramikler arasında alümina (Al_2O_3), zirkonya (ZrO_2), silisyum nitrür/SiAlON ve pirolitik karbon bulunmaktadır. Özellikle zirkonya yüksek kırılma tokluğu, aşınma direnci ve uzun klinik kullanım geçmişi nedeniyle kalça protezleri, dental implantlar ve eklem protezlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [14-16].

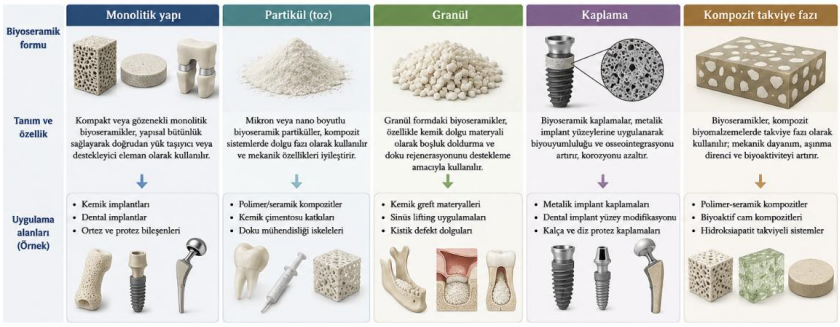
2.1.3. Biyorezorbe Olabilen Biyoseramikler

Biyorezorbe olabilen biyoseramikler, implantasyon sonrasında kontrollü bir şekilde çözünerek veya parçalanarak zamanla doğal doku tarafından yer

değiştiren malzemelerdir. Bu malzemelerin temel amacı, geçici mekanik destek sağlarken yeni doku oluşumunu teşvik etmek ve iyileşme tamamlandıktan sonra organizma tarafından tamamen elimine edilmektir.(Biyorezorpsiyon süreci boyunca seramik yapının bozunması sonucu ortaya çıkan iyonlar ve parçalanma ürünleri, vücudun doğal metabolik mekanizmaları tarafından uzaklaştırılır veya yeni oluşan doku tarafından kullanılır. Böylece ikinci bir cerrahi müdahaleyle implantın çıkarılması gerekliliği ortadan kalkar [17]. Bu grup içerisinde en yaygın kullanılan biyoseramikler arasında trikalsiyum fosfat (TCP), kalsiyum fosfat seramikleri, kalsiyum sülfat, kalsiyum alüminat bazlı seramikler ve çeşitli fosfat esaslı biyobozunur sistemler yer almaktadır. Özellikle TCP ve diğer kalsiyum fosfat türevleri, kemik yenilenme hızına yakın rezorpsiyon davranışları nedeniyle kemik greftleri ve doku mühendisliği uygulamalarında büyük ilgi görmektedir [18, 19].

2.2 Biyoseramiklerin Kullanım Formları

Biyoseramikler, kullanım alanına ve klinik gereksinimlere bağlı olarak monolitik yapı, partikül, granül, kaplama veya kompozit takviye fazı şeklinde üretilebilmektedir. Monolitik biyoseramikler implant, protez ve ortez bileşenlerinde doğrudan yapısal malzeme olarak kullanılırken, partikül formundaki biyoseramikler kompozit biyomalzemelerde dolgu fazı olarak mekanik özelliklerin iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, biyoseramik kaplamalar özellikle metalik implantların yüzeylerine uygulanarak biyouyumluluğun artırılması, kemikle biyolojik bağ oluşumunun hızlandırılması ve implantların uzun dönem klinik performansının geliştirilmesi amacıyla tercih edilmektedir [20-22]. Şekil 2.1'de biyoseramiklerin biyomedikal uygulamalarda kullanım formları (monolitik yapı, partikül, granül, kaplama ve kompozit takviye fazı) ve başlıca uygulama alanları verilmiştir.



Şekil 2.1. Biyoseramiklerin biyomedikal uygulamalarda kullanım formları (monolitik yapı, partikül, granül, kaplama ve kompozit takviye fazı) ve başlıca uygulama alanları (kaynak 20, 21,22 esas alınarak yazar tarafından yapay zeka ile oluşturulmuştur.).

2.3 Biyoseramiklerin Avantaj ve Dezavantajları

Biyoseramikler, yüksek biyouyumlulukları, kimyasal kararlılıkları ve biyolojik dokularla etkileşim kurabilme yetenekleri sayesinde günümüzde ortopedi, diş hekimliği ve doku mühendisliği başta olmak üzere birçok biyomedikal uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır [23]. Malzeme teknolojisindeki gelişmelerle birlikte yalnızca yapısal destek sağlayan biyoseramiklerden, hücresel yanıtları düzenleyebilen, doku rejenerasyonunu teşvik eden ve kontrollü biyolojik işlevler gösterebilen yeni nesil biyoseramiklere doğru önemli bir dönüşüm yaşanmıştır [24]. Bununla birlikte, biyoseramiklerin sahip olduğu üstün özelliklerin yanında bazı mekanik ve üretim kaynaklı sınırlılıkları da bulunmaktadır. Bu nedenle biyoseramik seçimi yapılırken uygulama alanına özgü avantaj ve dezavantajların birlikte değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Tablo 2.1'de biyoseramiklerin avantaj ve dezavantaj özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.1. Biyoseramiklerin avantaj ve dezavantaj özellikleri

Avantajlar	**Dezavantajlar**
Yüksek biyouyumluluk	Gevrek yapı
Osteokondüktif ve biyoaktif özellik	Düşük kırılma tokluğu
Osseointegrasyonu destekleme	Düşük çekme dayanımı
Kimyasal kararlılık ve korozyon direnci	Yorulma çatlaklarına duyarlılık
Yüksek sertlik ve aşınma direnci	Karmaşık üretim süreçleri
Kontrollü iyon salınımı ile kemik rejenerasyonu	Yüksek üretim maliyeti
Düşük toksisite	Gözeneklilik arttıkça mekanik dayanımın azalması
Uzun dönem biyolojik stabilite	Biyobozunur seramiklerde bozunma hızının kontrol edilmesi gerekliliği

Biyoseramiklerin en önemli avantajlarından biri **üstün biyouyumluluklarıdır**. Vücut sıvılarıyla temas ettiklerinde toksik reaksiyon oluşturmamaları, inflamasyonu en aza indirmeleri ve çevre dokular tarafından iyi tolere edilmeleri, implant başarısını önemli ölçüde artırmaktadır. Özellikle hidroksiapatit, biyoaktif camlar ve wollastonit, implant yüzeyinde karbonatlı hidroksiapatit tabakasının oluşumunu destekleyerek kemik dokusu ile güçlü bir biyolojik bağ kurulmasını sağlar. Bu özellik, osteointegrasyonu hızlandırarak implant stabilitesini artırmakta ve iyileşme süresini kısaltmaktadır [23].

Bir diğer önemli avantaj, **yüksek korozyon ve kimyasal dayanımlarıdır**. Metal implantlarda uzun süreli kullanım sonucunda iyon salınımı ve korozyon görülebilirken, biyoseramikler fizyolojik ortamda kimyasal olarak oldukça kararlı davranış sergiler. Bu durum implantın uzun dönem performansını artırırken, çevre dokularda olası toksik etkilerin oluşma riskini de azaltmaktadır [23].

Biyoseramikler aynı zamanda **yüksek basma dayanımı ve aşınma direnci** göstermektedir. Özellikle alümina ve zirkonya gibi biyoinert seramikler yüksek

sertlikleri ve düşük aşınma oranları sayesinde kalça ve diz protezlerinin eklem yüzeylerinde uzun yıllardır güvenle kullanılmaktadır. Benzer şekilde silisyum nitrür, yüksek kırılma tokluğu, üstün aşınma direnci ve doğal antibakteriyel özellikleri sayesinde yük taşıyan ortopedik implantlarda giderek daha fazla ilgi görmektedir [23].

Son yıllarda geliştirilen biyoaktif biyoseramikler, yalnızca yapısal destek sağlamakla kalmayıp **kemik rejenerasyonunu uyarma**, hücre proliferasyonunu destekleme ve kontrollü iyon salınımı yoluyla biyolojik süreçleri düzenleme yeteneğine de sahiptir. Özellikle kalsiyum, fosfor, silisyum, magnezyum ve stronsiyum gibi biyolojik açıdan aktif iyonların kontrollü salınımı osteoblast aktivitesini artırmakta, anjiyogenezi desteklemekte ve yeni kemik oluşumunu hızlandırmaktadır. Bu nedenle biyoseramikler, rejeneratif tıp ve doku mühendisliği uygulamalarında önemli bir biyomalzeme grubu olarak değerlendirilmektedir [24,25].

Bununla birlikte biyoseramiklerin bazı önemli dezavantajları da bulunmaktadır. Bunların başında **gevrek yapıları ve düşük kırılma toklukları** gelmektedir. Seramik malzemeler plastik deformasyon göstermeden ani kırılmaya eğilimli olduklarından darbe veya çekme yükleri altında metal implantlara göre daha düşük güvenilirlik sergileyebilmektedir. Bu durum özellikle yüksek dinamik yüklerin bulunduğu kalça, diz ve omurga implantlarında kullanım alanlarını sınırlayabilmektedir [20, 21].

Bir diğer önemli sınırlılık ise **düşük çekme ve yorulma dayanımıdır**. Seramikler basma yükleri altında oldukça başarılı performans gösterirken, tekrarlı yüklemeler sırasında mikroçatlak oluşumu ve çatlak ilerlemesi görülebilmektedir. Bu nedenle yüksek mekanik yük taşıyan uygulamalarda biyoseramikler çoğu zaman metal veya polimer esaslı kompozit sistemlerle birlikte kullanılmaktadır [20, 21].

Biyoseramiklerin üretim süreçleri de bazı zorluklar içermektedir. Yüksek saflıkta hammaddelerin kullanılması, kontrollü sinterleme koşullarının sağlanması ve karmaşık geometrilere sahip implantların üretilmesi üretim maliyetlerini artırmaktadır. Ayrıca gözenekli yapıların mekanik dayanımı ile biyolojik performansı arasında bir denge kurulması gerekmektedir. Gözenekliliğin artması hücre infiltrasyonu, damar oluşumu ve kemik büyümesini desteklerken, aynı zamanda malzemenin mekanik dayanımını azaltabilmektedir [21].

Biyobozunur biyoseramiklerde **ise** bozunma hızının kontrolü **önemli** bir tasarım kriteridir. Malzemenin çok hızlı çözünmesi mekanik desteğin erken kaybedilmesine neden olurken, çok yavaş bozunması yeni oluşan kemik dokusunun yerini almasını geciktirebilmektedir. Bu nedenle bozunma kinetiğinin hedeflenen doku iyileşme süreciyle uyumlu olacak şekilde optimize edilmesi gerekmektedir [26,27].

Son yıllarda nanoteknoloji, katkılı üretim (3D baskı), fonksiyonel yüzey modifikasyonları ve kompozit biyomalzemelerin geliştirilmesi sayesinde biyoseramiklerin mekanik performansı ve biyolojik etkinliği önemli ölçüde artırılmıştır. Özellikle polimer–biyoseramik ve metal–biyoseramik kompozitleri, gevreklik problemini azaltırken biyouyumluluğu koruyarak daha güvenilir implant tasarımlarının geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca çok ölçekli gözenek mimarileri, akıllı iyon salınım sistemleri ve biyolojik olarak aktif yüzey kaplamaları, biyoseramiklerin gelecekte daha geniş biyomedikal uygulamalarda kullanılmasını destekleyen önemli teknolojik gelişmeler arasında yer almaktadır [28,29].

3. Biyoseramiklerin Yapısal ve Biyolojik Özellikleri

Biyoseramikler, biyolojik sistemlerle doğrudan etkileşime girebilen, yüksek biyouyumluluk gösteren ve özellikle sert doku uygulamalarında yaygın olarak kullanılan ileri mühendislik seramikleridir. Kimyasal bileşimleri, kristal yapıları, yüzey özellikleri ve mikro/nano ölçekteki mimarileri sayesinde kemik dokusu ile güçlü etkileşim kurabilmeleri, bu malzemeleri ortopedi, diş hekimliği ve doku mühendisliği alanlarında vazgeçilmez biyomalzemeler haline getirmiştir. Geleneksel seramiklerden farklı olarak biyoseramikler yalnızca mekanik destek sağlamakla kalmaz; aynı zamanda hücresel davranışları düzenleyerek kemik rejenerasyonunu yönlendirebilen biyolojik fonksiyonlar da üstlenebilirler [30,31].

3.1 Yapısal Özellikler

Biyoseramiklerin performansı büyük ölçüde kristal yapıları, faz bileşimleri, yoğunlukları, poroziteleri ve yüzey topografyaları tarafından belirlenmektedir. Malzemenin kristallik derecesi çözünme hızını, iyon salınımını ve biyolojik cevabı doğrudan etkilerken, tane boyutu ve mikroyapı mekanik dayanım üzerinde önemli rol oynamaktadır. Özellikle nano boyutlu kristaller doğal kemik mineraline daha fazla benzerlik gösterdiğinden protein adsorpsiyonu ve hücre adezyonu açısından avantaj sağlamaktadır [32, 33].

Biyoseramiklerde gözeneklilik (porozite), biyolojik performansı belirleyen en önemli parametrelerden biridir. Makrogözenekler (100–500 μm) vaskülarizasyon ve yeni kemik oluşumunu kolaylaştırırken, mikrogözenekler (<10 μm) protein adsorpsiyonu, iyon değişimi ve biyolojik sıvıların taşınımını desteklemektedir. Bununla birlikte porozitenin artması, mekanik dayanımın azalmasına neden olduğundan biyoseramik tasarımında biyolojik aktivite ile mekanik performans arasında optimum bir denge kurulması gerekmektedir. Bu nedenle günümüzde kontrollü poroziteye sahip üç boyutlu iskele yapıları ve fonksiyonel derecelendirilmiş (functionally graded) biyoseramikler geliştirilmektedir [34].

Biyoseramiklerin mekanik özellikleri malzemenin kimyasal yapısına göre önemli farklılıklar göstermektedir. Alumina (Al_2O_3) ve zirkonya (ZrO_2) yüksek

sertlik, aşınma direnci ve mukavemet sayesinde yük taşıyan implantlarda tercih edilirken, hidroksiapatit (HA), trikalsiyum fosfat (TCP) ve biyoaktif camlar daha düşük mekanik dayanımlarına karşın üstün biyolojik özellikleri nedeniyle kemik greftleri, kaplamalar ve doku mühendisliği iskelelerinde kullanılmaktadır. Son yıllarda mikro-nano kompozit yapılar ve hibrit biyoseramikler geliştirilerek bu malzemelerin kırılganlıklarının azaltılması ve mekanik güvenilirliklerinin artırılması hedeflenmektedir [35].

3.2 Biyolojik Özellikler

Biyoseramiklerin en önemli avantajı yüksek biyouyumluluk göstermeleridir. Biyouyumluluk, implantın çevre dokuda toksik, inflamatuvar veya immünolojik reaksiyon oluşturmadan fonksiyonunu sürdürebilmesi olarak tanımlanmaktadır. Çoğu biyoseramik kimyasal olarak stabil olduğundan vücut sıvıları ile temas ettiğinde zararlı bozunma ürünleri oluşturmaz ve çevre dokular tarafından iyi tolere edilir [31].

Biyoseramiklerin biyolojik başarısını belirleyen temel özelliklerden biri biyoaktivitedir. Biyoaktif seramikler, fizyolojik ortamda yüzeylerinde karbonatlı hidroksiapatit tabakası oluşturarak kemik dokusu ile doğrudan kimyasal bağ kurabilmektedir. Bu olay, osteoblastların yüzeye tutunmasını kolaylaştırmakta, hücre proliferasyonunu artırmakta ve yeni kemik oluşumunu hızlandırmaktadır. Özellikle biyoaktif camlar ve kalsiyum fosfat esaslı seramikler kontrollü iyon salınımı sayesinde osteojenik farklılaşmayı destekleyen biyolojik sinyaller oluşturabilmektedir. Salınan Ca^{2+}, Si^{4+}, P^{5+} ve diğer biyolojik olarak aktif iyonlar, kemik matris sentezi ve mineralizasyon süreçlerinde önemli görev üstlenmektedir [34].

Kemik rejenerasyonunda önemli biyolojik özelliklerden biri de osteokondüktivitedir. Osteokondüktif biyoseramikler, kemik hücrelerinin yüzey boyunca göç etmesine ve yeni kemik oluşumuna rehberlik eden uygun bir iskele görevi görmektedir [36, 37].

Bunun yanında bazı biyoseramikler yalnızca osteokondüktif değil, aynı zamanda **osteoindüktif** özellik de gösterebilmektedir. Osteoindüksiyon, mezenkimal kök hücrelerin osteoblastlara farklılaşmasını uyararak yeni kemik oluşumunu başlatabilme yeteneğini ifade eder [38, 39].

Bu biyolojik etki yalnızca kimyasal bileşime değil; yüzey pürüzlülüğü, kristal yapı, gözenek mimarisi, iyon salınımı ve yüzey enerjisi gibi birçok fiziko-kimyasal özelliğin birlikte etkisiyle ortaya çıkmaktadır [40].

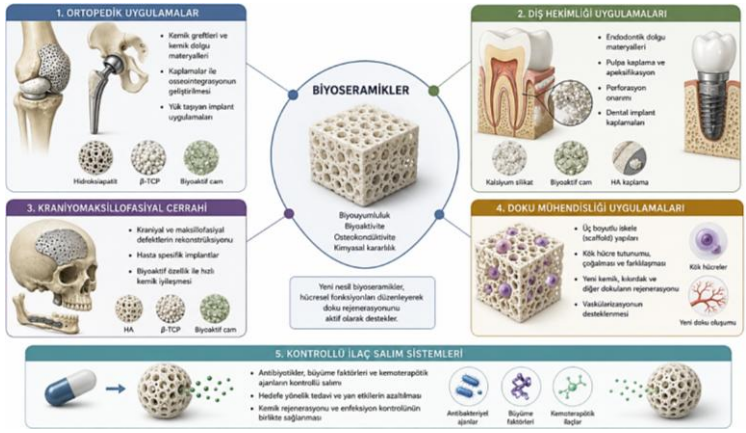
Biyoseramiklerin biyolojik performansı yüzey özelliklerinden büyük ölçüde etkilenmektedir. Nano ölçekte pürüzlü yüzeyler hücre adezyonunu artırırken protein adsorpsiyonunu kolaylaştırmakta ve integrin aracılı hücre sinyallemesini güçlendirmektedir. Günümüzde yüzey fonksiyonelleştirme teknikleri ile biyoseramik yüzeylerine büyüme faktörleri, peptitler, antibakteriyel ajanlar veya

terapötik iyonlar yüklenerek yalnızca kemik rejenerasyonu değil, aynı zamanda enfeksiyon kontrolü ve kontrollü ilaç salımı da sağlanabilmektedir. Özellikle stronsiyum, magnezyum, çinko, silisyum ve bakır iyonları ile katkılanmış biyoseramiklerin osteogenez ve anjiyogenezi artırdığı çok sayıda çalışma ile gösterilmiştir [34].

Son yıllarda biyoseramik araştırmaları yalnızca biyouyumluluk üzerine değil, aynı zamanda "immünomodülatör biyoseramik" kavramı üzerine yoğunlaşmaktadır. Yeni nesil biyoseramikler, makrofaj polarizasyonunu düzenleyerek inflamasyonun çözülmesini hızlandırmakta ve rejeneratif mikroçevrenin oluşmasını desteklemektedir. Bunun yanında üç boyutlu yazdırma teknolojileri sayesinde hasta spesifik gözenek mimarisine sahip biyoseramik implantların geliştirilmesi, kişiselleştirilmiş kemik rejenerasyonu açısından önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir [20, 21, 34, 35, 40-42].

4. Biyomedikal Uygulama Alanları

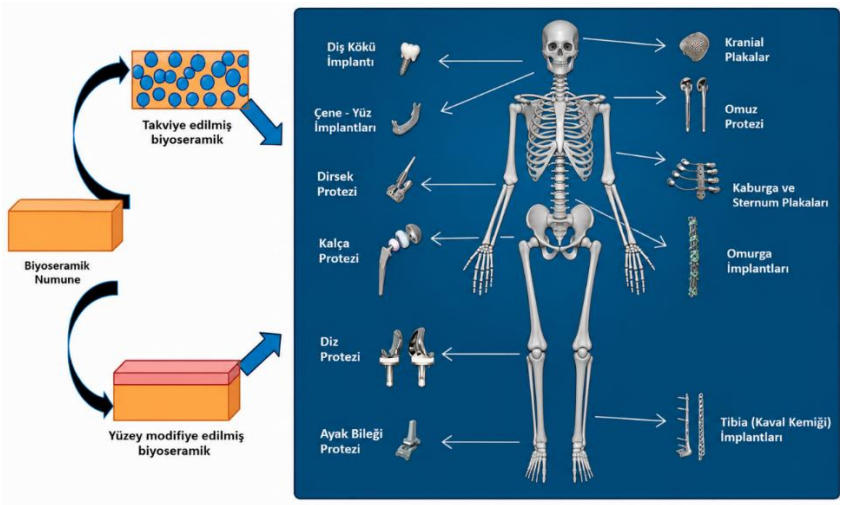
Biyoseramikler, üstün biyouyumlulukları, yüksek kimyasal kararlılıkları, osteokondüktif ve biyoaktif özellikleri sayesinde günümüzde birçok biyomedikal alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Geliştirilen yeni nesil biyoseramikler yalnızca doku kayıplarını onarmakla kalmayıp, aynı zamanda hücresel fonksiyonları düzenleyerek doku rejenerasyonunu aktif olarak destekleyen biyofonksiyonel materyaller olarak değerlendirilmektedir. Özellikle ortopedi, diş hekimliği, kraniyomaksillofasiyal cerrahi, doku mühendisliği ve kontrollü ilaç salım sistemleri biyoseramiklerin en yoğun kullanıldığı alanlar arasında yer almaktadır [43]. Şekil 4.1.'de biyoseramiklerin biyomedikal uygulamalarda kullanım formları ve kullanılan malzemelere örnekler verilmiştir.



Şekil 4.1. Biyoseramiklerin biyomedikal uygulamalarda kullanım formları ve kullanılan malzemelere örnekler

4.1 Ortopedik Uygulamalar

Ortopedi, biyoseramiklerin klinikte en yaygın kullanıldığı alanlardan biridir. Hidroksiapatit (HA), β-trikalsiyum fosfat (β-TCP), biyoaktif camlar ve kalsiyum silikat esaslı biyoseramikler kemik defektlerinin doldurulması, kemik greftleri, implant kaplamaları ve kemik doku mühendisliği iskelelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [44]. Bu malzemeler kemik mineraline kimyasal olarak benzer yapıları sayesinde implant ile çevre kemik arasında güçlü bir biyolojik bağ oluşturarak osseointegrasyonu hızlandırmaktadır. Ayrıca kontrollü çözünme özellikleri sayesinde yeni kemik oluşumu sırasında yerlerini doğal kemiğe bırakabilmektedirler [42]. Şekil 4.2.'de ortopedik uygulamalarda kullanılan biyoseramiklerin kullanım alanlarına örnekler verilmiştir.



Şekil 4.2. Ortopedik uygulamalarda kullanılan biyoseramiklerin kullanım alanlarına örnekler [35]

Son yıllarda kemik doku mühendisliği alanında dikkat çeken kalsiyum-silikat esaslı biyoseramiklerden biri de hardistonit ($Ca_2ZnSi_2O_7$), dir. Yapısında bulunan **kalsiyum (Ca), silisyum (Si) ve çinko (Zn)** iyonları sayesinde yalnızca osteokondüktif bir iskele görevi görmekle kalmayıp aynı zamanda kemik rejenerasyonunu biyolojik olarak uyaran biyoaktif bir malzeme olarak değerlendirilmektedir. Özellikle çinko iyonlarının osteoblast proliferasyonu ve farklılaşmasını desteklemesi, silisyumun ise kolajen sentezi ve mineralizasyon üzerindeki olumlu etkileri hardistoniti hidroksiapatit ve bazı geleneksel kalsiyum fosfat biyoseramiklerine kıyasla önemli bir alternatif haline getirmiştir [45]. Ayrıca son yıllarda silikat esaslı biyoseramikler, magnezyum içeren bredigit ve akermanit gibi yeni kompozisyonlar da kemik rejenerasyonunda umut verici sonuçlar ortaya koymuştur [46].

Yük taşıyan ortopedik implantlarda ise yüksek mekanik dayanım gereksinimi nedeniyle alumina ve itriya ile stabilize edilmiş zirkonya gibi biyoinert seramikler tercih edilmektedir. Özellikle total kalça ve diz protezlerinde kullanılan seramik

femoral başlar, düşük sürtünme katsayıları ve üstün aşınma dirençleri sayesinde implant ömrünü önemli ölçüde uzatmaktadır [47, 48].

Silisyum nitrür (Si_3N_4), yüksek eğilme dayanımı (800–1200 MPa), yüksek elastik modülü (yaklaşık 300 GPa), üstün kırılma tokluğu (6–10 $MPa \cdot m^{1/2}$) ve mükemmel aşınma direnci sayesinde yük taşıyan ortopedik implant uygulamalarında dikkat çeken biyoseramiklerden biridir. Özellikle kalça ve diz protezlerinin eklem yüzeyleri, omurga implantları (intervertebral füzyon kafesleri), kemik vidaları ve çeşitli yük taşıyan implant bileşenlerinde kullanılmaya başlanmıştır. Metal implantlara kıyasla daha düşük aşınma partikülü oluşumu göstermesi, iyon salınımı yapmaması ve uzun dönem biyolojik stabilitesi önemli avantajları arasında yer almaktadır. Bunun yanında Si_3N_4 yüzeyinde meydana gelen hidroliz reaksiyonları sonucunda oluşan silanol (Si–OH) grupları, osteoblastların yüzeye tutunmasını kolaylaştırmakta ve kemik mineralizasyonunu desteklemektedir. Ayrıca kontrollü amonyak ve reaktif azot türlerinin oluşumu sayesinde birçok patojen bakteriye karşı doğal antibakteriyel etki gösterdiği bildirilmiştir. Bu özellikler, implant çevresinde enfeksiyon riskinin azaltılmasına katkı sağlarken aynı zamanda osseointegrasyonu da hızlandırmaktadır. Son yıllarda gerçekleştirilen in vitro, in vivo ve klinik çalışmalar, silisyum nitrürün özellikle omurga füzyon implantlarında başarılı klinik sonuçlar verdiğini ve gelecekte kalça ile diz protezleri gibi yüksek yük taşıyan ortopedik uygulamalarda kullanım potansiyelinin oldukça yüksek olduğunu göstermektedir [16, 49, 50].

4.2 Dental Uygulamalar

Diş hekimliği biyoseramiklerin en hızlı gelişim gösterdiği uygulama alanlarından biridir. Endodontide kullanılan kalsiyum silikat esaslı biyoseramik simanlar, kök kanal dolgu materyalleri, apeksifikasyon tedavileri, perforasyon onarımları ve pulpa kaplama işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu materyaller yüksek biyouyumluluklarının yanı sıra dentin köprüsü oluşumunu teşvik etmekte ve sert doku rejenerasyonunu desteklemektedir. Aynı zamanda antibakteriyel özellikleri sayesinde endodontik enfeksiyonların kontrolüne katkı sağlamaktadır [51].

Dental implantlarda hidroksiapatit kaplamalar, titanyum implantların kemikle bütünleşmesini hızlandırmak amacıyla uzun yıllardır başarıyla uygulanmaktadır. Günümüzde biyoseramik nanopartiküller dental kompozit rezinler, adeziv sistemler ve kemik greft materyallerine eklenerek mekanik dayanımın artırılması, biyofilm oluşumunun azaltılması ve remineralizasyonun desteklenmesi hedeflenmektedir [43].

4.3 Kraniyomaksillofasiyal Rekonstrüksiyon

Kraniyal ve maksillofasiyal kemik defektlerinin tedavisinde biyoseramikler önemli avantajlar sunmaktadır. Özellikle hasta spesifik implantların

geliştirilmesiyle birlikte karmaşık anatomik yapıların başarılı şekilde yeniden oluşturulması mümkün hale gelmiştir. Biyoaktif camlar ve kalsiyum fosfat esaslı seramikler, osteokondüktif özellikleri sayesinde yeni kemik oluşumunu hızlandırırken enfeksiyon riskini azaltmaktadır. Son yıllarda üç boyutlu yazdırılmış biyoseramik implantlar, yüz kemiklerinin rekonstrüksiyonunda giderek daha fazla klinik ilgi görmektedir [52].

4.4 Doku Mühendisliği ve Rejeneratif Tıp

Biyoseramikler, doku mühendisliğinde hücrelerin çoğalması, farklılaşması ve ekstraselüler matris üretimi için uygun mikroçevre sağlayan üç boyutlu iskelelerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Gözenekli biyoseramik iskeleler kemik iliği mezenkimal kök hücrelerinin tutunmasını kolaylaştırmakta ve vaskülarizasyonu desteklemektedir. Ayrıca biyoseramiklerin kontrollü iyon salınımı osteogenez, anjiyogenez ve immünomodülasyon süreçlerini uyararak doku rejenerasyonunu hızlandırmaktadır [42].

4.5 İlaç Salımı ve Biyofonksiyonel Sistemler

Nanoyapılı biyoseramikler, kontrollü ilaç salım sistemlerinde taşıyıcı materyal olarak önemli bir yer edinmiştir. Mezogözenekli biyoseramikler antibiyotikler, antikanser ilaçları, büyüme faktörleri ve osteojenik proteinlerin kontrollü salınmasına olanak sağlamaktadır. Böylece sistemik ilaç kullanımına bağlı yan etkiler azaltılırken tedavi etkinliği artırılmaktadır. Son yıllarda biyoseramiklerin aynı anda kemik rejenerasyonu, antibakteriyel etki ve kontrollü ilaç salımı gerçekleştirebilen çok fonksiyonlu platformlar olarak geliştirilmesine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır [43].

5. Son Yıllarda Ortaya Çıkan Yenilikçi Teknolojiler

Biyoseramik teknolojileri son on yılda yalnızca yeni malzemelerin geliştirilmesiyle sınırlı kalmamış; üretim yöntemleri, yüzey mühendisliği, nanoteknoloji, akıllı biyomalzemeler ve yapay zekâ destekli tasarım yaklaşımlarıyla birlikte önemli bir dönüşüm geçirmiştir. Günümüzde biyoseramik araştırmaları biyolojik olarak aktif, hasta spesifik ve çok fonksiyonlu implant sistemlerinin geliştirilmesine odaklanmaktadır [43].

5.1 Üç Boyutlu Yazdırma Teknolojileri

Katmanlı üretim teknolojileri (3D printing), biyoseramik implant tasarımında devrim niteliğinde gelişmeler sağlamıştır. Geleneksel üretim yöntemlerinden farklı olarak üç boyutlu yazdırma ile gözenek boyutu, porozite dağılımı ve implant geometrisi yüksek hassasiyetle kontrol edilebilmektedir. Böylece hastaya özgü anatomik yapılar üretilebilmekte ve kemik rejenerasyonu için ideal biyomekanik özellikler elde edilebilmektedir. Özellikle hidroksiapatit, β-TCP ve biyoaktif cam esaslı iskeleler kemik doku mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır [53].

5.2 Nano-Biyoseramikler

Nanoteknolojinin gelişmesiyle birlikte biyoseramikler nano boyutta üretilebilmekte ve doğal kemik mineraline daha yakın özellikler gösterebilmektedir. Nano hidroksiapatit, nano biyoaktif cam ve nano kalsiyum fosfat partikülleri yüksek yüzey alanları sayesinde protein adsorpsiyonunu artırmakta, osteoblast adezyonunu hızlandırmakta ve kemik rejenerasyonunu desteklemektedir. Ayrıca bu nanopartiküller dental kompozitler, implant kaplamaları ve biyobaskı mürekkeplerinde takviye fazı olarak kullanılmaktadır [54].

5.3 Akıllı ve İmmünomodülatör Biyoseramikler

Yeni nesil biyoseramikler yalnızca biyouyumlu değil, aynı zamanda çevresel değişikliklere yanıt verebilen "akıllı biyomalzemeler" olarak geliştirilmektedir. Kontrollü iyon salınımı yapan biyoseramikler osteogenezi, anjiyogenezi ve immün yanıtı düzenleyerek implant başarısını artırmaktadır. Özellikle Sr^{2+}, Cu^{2+}, Zn^{2+} ve Mg^{2+} iyonları ile katkılanmış biyoseramikler kemik oluşumunu teşvik ederken antibakteriyel etki de göstermektedir. Bunun yanında makrofaj polarizasyonunu düzenleyebilen immünomodülatör biyoseramikler, inflamasyonu kontrol ederek rejeneratif iyileşmeyi desteklemektedir [55].

5.4 Antibakteriyel Biyoseramikler

Periprostetik enfeksiyonlar ortopedik ve dental implantların en önemli komplikasyonlarından biridir. Bu nedenle son yıllarda antibiyotik kullanımına bağımlılığı azaltan antibakteriyel biyoseramikler geliştirilmektedir. Gümüş, bakır, çinko ve galyum iyonları ile fonksiyonelleştirilen biyoseramikler bakteriyel biyofilm oluşumunu engellerken aynı zamanda osteoblast fonksiyonlarını koruyabilmektedir. Bu yaklaşım özellikle antibiyotik direncinin arttığı günümüzde önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır [55].

5.5 Yapay Zekâ Destekli Malzeme Tasarımı

Son yıllarda yapay zekâ ve makine öğrenmesi algoritmaları biyoseramik geliştirme süreçlerine entegre edilmeye başlanmıştır. Bu yöntemler; malzeme kompozisyonunun optimize edilmesi, gözenek mimarisinin tasarlanması, mekanik performansın tahmin edilmesi ve üretim parametrelerinin iyileştirilmesinde kullanılmaktadır. Hesaplamalı modelleme ile deneysel çalışmaların birlikte yürütülmesi, yeni biyoseramiklerin geliştirilme süresini önemli ölçüde kısaltmaktadır. Ayrıca dijital ikiz (digital twin) teknolojileri ve hesaplamalı biyomalzeme tasarımı, geleceğin kişiselleştirilmiş implantlarının geliştirilmesinde önemli rol oynamaktadır [43].

6. Gelecek Perspektifleri ve Karşılaşılan Zorluklar

Biyoseramikler, son kırk yılda biyomedikal mühendisliğinin en hızlı gelişen biyomalzeme sınıflarından biri haline gelmiştir. İlk nesil biyoseramikler temel

olarak biyoinert özellik göstermeyi amaçlarken, günümüzde geliştirilen üçüncü nesil biyoseramikler hücresel yanıtları düzenleyebilen, doku rejenerasyonunu uyarabilen ve biyolojik süreçlere aktif olarak katılabilen fonksiyonel biyomalzemeler olarak tasarlanmaktadır. Bu dönüşüm, malzeme bilimi, nanoteknoloji, biyomühendislik, yapay zekâ ve eklemeli imalat teknolojilerindeki ilerlemeler sayesinde hız kazanmıştır [21, 41].

Bununla birlikte, biyoseramiklerin laboratuvar ortamında elde edilen başarılı sonuçlarının rutin klinik uygulamalara aktarılabilmesi için çözülmesi gereken önemli bilimsel ve teknolojik zorluklar bulunmaktadır. Özellikle mekanik performans, biyolojik fonksiyonların uzun dönem stabilitesi, üretim standartlarının oluşturulması ve maliyet etkin üretim süreçleri, gelecekte üzerinde yoğunlaşılması gereken araştırma alanları olarak öne çıkmaktadır.

6.1 Mekanik Dayanım ve Kırılganlık Problemi

Biyoseramiklerin en önemli dezavantajlarından biri düşük kırılma tokluğu ve gevrek davranış göstermeleridir. Hidroksiapatit, β-trikalsiyum fosfat ve biyoaktif camlar yüksek biyolojik performans sunmalarına rağmen yük taşıyan bölgelerde kullanılabilecek yeterli mekanik dayanımı sağlayamamaktadır. Seramiklerin yüksek elastik modülü ve düşük çatlak ilerleme direnci ani kırılmalara neden olabilmekte, bu durum özellikle ortopedik implantlarda kullanım alanlarını sınırlandırmaktadır [20, 56]. Bu nedenle günümüzde araştırmalar;

- mikro-nano hibrit kompozitlerin geliştirilmesi,
- lif takviyeli biyoseramikler,
- polimer-seramik kompozit sistemleri,
- fonksiyonel derecelendirilmiş (Functionally Graded Materials; FGM) yapılar,
- zirkonya ile tokluk artırma (transformation toughening)

gibi mekanik iyileştirme stratejilerine odaklanmaktadır. Özellikle polimer destekli biyoseramik kompozitlerin doğal kemiğin hiyerarşik yapısını daha başarılı şekilde taklit edebildiği bildirilmektedir [57].

6.2 Kontrollü Biyobozunma ve İyon Salınımı

Kemik rejenerasyonunda kullanılan biyoseramiklerde en önemli tasarım kriterlerinden biri kontrollü biyobozunma davranışıdır. İdeal bir biyoseramik, yeni kemik oluşum hızı ile uyumlu şekilde çözünmeli ve yerini doğal kemiğe bırakmalıdır. Ancak birçok biyoseramik ya çok hızlı çözünerek mekanik bütünlüğünü kaybetmekte ya da oldukça yavaş çözünerek yeni kemik oluşumunu sınırlandırmaktadır.

Benzer şekilde biyolojik olarak aktif iyonların kontrollü salınımı da önemli bir araştırma konusudur. Günümüzde stronsiyum (Sr), magnezyum (Mg),

silisyum (Si), çinko (Zn), bakır (Cu) ve galyum (Ga) katkılı biyoseramiklerin osteogenez, anjiyogenez ve antibakteriyel etkinliği artırdığı gösterilmiş olsa da bu iyonların uzun dönem toksisite sınırlarının ve optimum salım kinetiklerinin tam olarak belirlenebilmesi için daha fazla in vivo çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır [34].

6.3 Biyoseramiklerin Klinik Uygulamaya Aktarım Süreci

Son yıllarda biyoseramikler üzerine yayımlanan bilimsel yayın sayısında önemli artış görülmesine rağmen laboratuvar ölçeğinde geliştirilen malzemelerin yalnızca sınırlı bir kısmı klinik uygulamaya ulaşabilmektedir. Bunun temel nedenleri arasında;

- uzun dönem hayvan deneylerinin yetersizliği,
- standardize edilmiş biyolojik test protokollerinin bulunmaması,
- üretim süreçlerinin ölçeklendirilememesi,
- düzenleyici kurumların (FDA, EMA vb.) onay süreçlerinin uzunluğu

yer almaktadır.

Ayrıca biyoseramiklerin uzun dönem biyolojik davranışları, implant sonrası oluşabilecek inflamatuvar yanıtlar, iyon salınımının sistemik etkileri ve implantların yıllar içerisindeki mekanik güvenilirliği hakkında daha kapsamlı klinik verilere ihtiyaç bulunmaktadır [41].

6.4 Kişiselleştirilmiş İmplant Tasarımı

Geleceğin biyoseramik teknolojilerinde en önemli eğilimlerden biri kişiselleştirilmiş (patient-specific) implantların geliştirilmesidir. Bilgisayarlı tomografi (BT) ve manyetik rezonans görüntüleme (MRG) verileri kullanılarak hastaya özgü üç boyutlu implant geometrileri oluşturulabilmekte, eklemeli üretim yöntemleri sayesinde bu tasarımlar kısa sürede üretilebilmektedir.

Hasta spesifik implantlar;

- daha iyi anatomik uyum,
- daha homojen yük dağılımı,
- daha hızlı osseointegrasyon,
- cerrahi sürenin kısalması

gibi önemli avantajlar sunmaktadır. Bununla birlikte üretim maliyetlerinin yüksek olması ve kalite kontrol süreçlerinin standartlaştırılamaması bu teknolojilerin yaygın kullanımını sınırlandırmaktadır [53].

6.5 Akıllı ve Çok Fonksiyonlu Biyoseramikler

Yeni nesil biyoseramik araştırmaları yalnızca kemik onarımını değil aynı zamanda implant çevresindeki biyolojik mikroçevrenin aktif olarak düzenlenmesini hedeflemektedir. Akıllı biyoseramikler;

- kontrollü ilaç salımı,
- antibakteriyel etki,
- immünomodülasyon,
- anjiyogenez,
- osteogenez

gibi birçok biyolojik fonksiyonu aynı implant içerisinde gerçekleştirebilmektedir.

Özellikle enfeksiyon geliştiğinde antibakteriyel ajan salabilen veya pH değişimine yanıt veren biyoseramik sistemler geleceğin implant teknolojileri arasında gösterilmektedir. Bunun yanında büyüme faktörleri, ekzozomlar ve kök hücrelerle kombine edilen biyoseramik iskeleler kemik rejenerasyonunda umut verici sonuçlar ortaya koymaktadır [58].

6.6 Yapay Zekâ ve Hesaplamalı Malzeme Tasarımı

Son yıllarda yapay zekâ (Artificial Intelligence; AI) ve makine öğrenmesi algoritmaları biyoseramik geliştirme çalışmalarında kullanılmaya başlanmıştır. Geleneksel biyomalzeme geliştirme sürecinde yüzlerce farklı kompozisyon deneysel olarak test edilirken, yapay zekâ destekli algoritmalar en uygun malzeme bileşimlerini kısa sürede tahmin edebilmektedir.

Makine öğrenmesi;

- mekanik özelliklerin öngörülmesi,
- biyouyumluluğun tahmin edilmesi,
- gözenek mimarisinin optimizasyonu,
- sinterleme parametrelerinin belirlenmesi,
- üretim hatalarının azaltılması

gibi birçok alanda önemli katkılar sağlamaktadır.

Gelecekte dijital ikiz (Digital Twin) teknolojilerinin biyoseramik implant tasarımına entegre edilmesiyle birlikte implantların klinik performanslarının ameliyat öncesinde simüle edilmesi mümkün olabilecektir [59].

6.7 Sürdürülebilir ve Çevre Dostu Üretim

Son yıllarda biyoseramik üretiminde sürdürülebilir yaklaşımlar da önem kazanmaktadır. Deniz kabukları, mercanlar, yumurta kabukları, hayvansal

kemikler ve çeşitli doğal mineral kaynaklarından hidroksiapatit üretimi üzerine çok sayıda çalışma yürütülmektedir. Bu biyojenik kaynaklar yalnızca maliyetleri azaltmakla kalmayıp döngüsel ekonomi ve çevresel sürdürülebilirlik açısından da önemli avantajlar sağlamaktadır. Bunun yanında düşük enerji tüketen sinterleme teknikleri, mikrodalga sinterleme ve soğuk sinterleme gibi yenilikçi üretim yöntemleri karbon ayak izinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır [31].

7. Genel Değerlendirme

Biyoseramik teknolojilerinin geleceği; malzeme bilimi, biyoloji, klinik tıp ve dijital üretim teknolojilerinin disiplinler arası entegrasyonuna bağlıdır. Önümüzdeki yıllarda biyoseramiklerin yalnızca kemik yerine geçen pasif implantlar değil, biyolojik süreçleri yönlendirebilen, enfeksiyonları önleyebilen, ilaç salımı gerçekleştirebilen ve doku rejenerasyonunu hızlandırabilen akıllı biyomalzemeler olarak geliştirilmesi beklenmektedir. Bununla birlikte bu teknolojilerin klinik uygulamaya aktarılabilmesi için uzun dönem biyogüvenlik çalışmalarının tamamlanması, uluslararası standartların oluşturulması ve ekonomik olarak sürdürülebilir üretim süreçlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Yapay zekâ destekli tasarım, biyobaskı teknolojileri ve kişiselleştirilmiş implant üretimi ile birlikte biyoseramiklerin gelecekte ortopedi, diş hekimliği ve rejeneratif tıp uygulamalarında çok daha geniş kullanım alanı bulacağı öngörülmektedir.

8. Sonuç

Biyoseramikler, biyouyumlulukları, yüksek kimyasal kararlılıkları ve biyolojik dokularla etkileşim kurabilme yetenekleri sayesinde biyomedikal mühendisliğinin en önemli biyomalzeme gruplarından biri haline gelmiştir. Başlangıçta yalnızca biyoinert destek materyalleri olarak geliştirilen biyoseramikler, günümüzde kemik rejenerasyonunu destekleyen, hücresel fonksiyonları düzenleyen ve kontrollü biyolojik yanıt oluşturabilen ileri biyofonksiyonel malzemelere dönüşmüştür. Özellikle hidroksiapatit, trikalsiyum fosfat, biyoaktif camlar, alümina, zirkonya ve kalsiyum silikat esaslı biyoseramikler; ortopedi, diş hekimliği, kraniyomaksillofasiyal cerrahi ve doku mühendisliği uygulamalarında başarılı klinik sonuçlar ortaya koymaktadır.

Biyoseramiklerin biyolojik başarısı yalnızca kimyasal bileşimlerinden değil, aynı zamanda kristal yapıları, gözenek mimarileri, yüzey topografileri ve kontrollü iyon salınımı gibi çok sayıda fizikokimyasal özelliğin birlikte oluşturduğu karmaşık etkileşimlerden kaynaklanmaktadır. Son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalar, özellikle nano ölçekli yapıların ve biyolojik olarak aktif iyon katkılarının osteogenez, anjiyogenez, immünomodülasyon ve antibakteriyel etkinlik üzerinde önemli rol oynadığını göstermektedir. Böylece biyoseramikler yalnızca hasarlı dokunun yerine geçen pasif implantlar olmaktan çıkarak, doku iyileşmesini yönlendiren aktif biyomalzemeler haline gelmiştir.

Eklemeli imalat teknolojileri, nanoteknoloji, yüzey fonksiyonelleştirme yöntemleri ve yapay zekâ destekli malzeme tasarımı, biyoseramik araştırmalarına yeni bir boyut kazandırmıştır. Üç boyutlu yazdırma teknikleri sayesinde hasta anatomisine özgü implantların üretilebilmesi, kontrollü gözenek mimarisine sahip biyoseramik iskelelerin geliştirilmesi ve biyobaskı uygulamalarının yaygınlaşması, rejeneratif tıp alanında önemli ilerlemeler sağlamaktadır. Aynı zamanda terapötik iyonlar, büyüme faktörleri, antibakteriyel ajanlar ve ilaç taşıyıcı sistemlerle fonksiyonelleştirilen çok amaçlı biyoseramikler, implant başarısını artırmaya yönelik yenilikçi çözümler sunmaktadır.

Bununla birlikte, biyoseramiklerin klinik kullanımının daha da yaygınlaşabilmesi için bazı temel zorlukların aşılması gerekmektedir. Özellikle gevrek mekanik davranış, düşük kırılma tokluğu, kontrollü biyobozunma hızının sağlanması, uzun dönem biyogüvenlik verilerinin yetersizliği ve laboratuvar ölçeğinde elde edilen başarılı sonuçların klinik uygulamalara aktarılmasındaki güçlükler güncelliğini korumaktadır. Ayrıca üretim süreçlerinin standardizasyonu, kalite kontrol sistemlerinin geliştirilmesi ve uluslararası düzenleyici gerekliliklerin karşılanması, biyoseramiklerin rutin klinik uygulamalara entegrasyonu açısından kritik öneme sahiptir.

Gelecekte biyoseramik araştırmalarının disiplinler arası yaklaşımlarla daha da ivme kazanacağı öngörülmektedir. Malzeme bilimi, biyoloji, biyomedikal mühendisliği, yapay zekâ, hesaplamalı modelleme ve klinik bilimlerin birlikte çalışmasıyla geliştirilecek yeni nesil biyoseramiklerin; hasta spesifik, çok fonksiyonlu, biyolojik olarak aktif ve uzun dönem güvenilir implant sistemlerine dönüşmesi beklenmektedir. Özellikle immünomodülatör biyoseramikler, akıllı ilaç salım sistemleri, biyobaskı ile üretilen canlı doku yapıları ve dijital ikiz teknolojileri, önümüzdeki yıllarda biyoseramik araştırmalarının temel odak noktalarını oluşturacaktır.

Sonuç olarak biyoseramikler, günümüz biyomedikal uygulamalarında yalnızca mevcut klinik gereksinimleri karşılayan malzemeler olmanın ötesinde, geleceğin rejeneratif tıp ve kişiselleştirilmiş tedavi yaklaşımlarının temel bileşenlerinden biri olmaya adaydır. Klinik gereksinimlerin doğru belirlenmesi, biyolojik mekanizmaların daha iyi anlaşılması ve ileri üretim teknolojilerinin etkin şekilde kullanılması ile biyoseramiklerin ortopedi, diş hekimliği ve doku mühendisliği başta olmak üzere birçok biyomedikal alanda daha güvenilir, uzun ömürlü ve fonksiyonel çözümler sunacağı öngörülmektedir. Bu doğrultuda, biyoseramiklerin geliştirilmesine yönelik multidisipliner araştırmaların artırılması ve temel bilim ile klinik uygulamalar arasındaki etkileşimin güçlendirilmesi, gelecekte daha başarılı ve sürdürülebilir biyomedikal implant teknolojilerinin geliştirilmesine önemli katkılar sağlayacaktır.

Kaynaklar

1. Hench, L. L. (Ed.). (2013). Introduction to Bioceramics, An. World Scientific Publishing Company.
2. Ravaglioli, A., & Krajewski, A. (1991). Bioceramics: materials· properties· applications. Springer Science & Business Media.
3. Hench, L. L. (1991). Bioceramics: from concept to clinic. Journal of the american ceramic society, 74(7), 1487-1510.
4. Dubok, V. A. (2000). Bioceramics—yesterday, today, tomorrow. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 39(7), 381-394.
5. Best, S. M., Porter, A. E., Thian, E. S., & Huang, J. (2008). Bioceramics: Past, present and for the future. Journal of the European Ceramic Society, 28(7), 1319-1327.
6. Kokubo, T. (Ed.). (2008). Bioceramics and their clinical applications. Elsevier.
7. Thamaraiselvi, T. V., & Rajeswari, S. (2004). Biological evaluation of bioceramic materials--a review. Trends in Biomaterials and Artificial Organs, 18(1), 9-18.
8. .Wu, C., & Chang, J. (2013). A review of bioactive silicate ceramics. Biomedical materials, 8(3), 032001.
9. Salinas, A. J., & Vallet-Regí, M. (2013). Bioactive ceramics: from bone grafts to tissue engineering. RSC advances, 3(28), 11116-11131.
10. Hench, L. L. (1994). Bioactive ceramics: Theory and clinical applications. In bioceramics (pp. 3-14). Pergamon.
11. Udduttula, A., Zhang, J. V., & Ren, P. G. (2019). Bioinert ceramics for biomedical applications. Biomedical Sci. and Tech. Series.
12. Marti, A. (2000). Inert bioceramics (Al2O3, ZrO2) for medical application. Injury, 31, D33-D36.
13. Moghanian, A., & Nasiripour, S. (2024). Bioinert ceramics for Biomedical applications. In Bioceramics: Status in Tissue Engineering and Regenerative Medicine (Part 1) (pp. 103-124). Bentham Science Publishers.
14. Mallik, A. K., Acikbas, N. C., Kara, F., Mandal, H., & Basu, D. (2012). A comparative study of SiAlON ceramics. Ceramics International, 38(7), 5757-5767.
15. Piconi, C. (2017). Bioinert ceramics: state-of-the-art. Key Engineering Materials, 758, 3-13.
16. Pezzotti, G. (2019). Silicon nitride: A bioceramic with a gift. Acta Biomaterialia, 88, 25–40.

17. Moghanian, A., Nasiripour, S., & Kolivand, N. (2024). Bioresorbable Ceramics: Processing and Properties. In Bioceramics: Status in Tissue Engineering and Regenerative Medicine (Part 1) (pp. 125-149). Bentham Science Publishers.

18. Dorozhkin, S. V. (2013). Calcium orthophosphate-based bioceramics. Materials, 6(9), 3840-3942.

19. Kamitakahara, M., Ohtsuki, C., & Miyazaki, T. (2008). Behavior of ceramic biomaterials derived from tricalcium phosphate in physiological condition. Journal of biomaterials applications, 23(3), 197-212.

20. Vallet-Regí, M., Manzano, M., González-Calbet, J. M., & Okamoto, M. (2021).Ceramic biomaterials: Properties, state of the art and future perspectives.Ceramics International, 47(20), 28059–28074.

21. Prakasam, M., Locs, J., Salma-Ancane, K., Loca, D., Largeteau, A., & Berzina-Cimdina, L. (2023). Ceramic Materials for Biomedical Applications: An Overview on Properties and Fabrication Processes.Materials, 16(7), 2458.

22. Dorozhkin, S. V. (2010).Bioceramics of calcium orthophosphates.Biomaterials, 31(7), 1465–1485.

23. Younas, A., Khan, M. U. A., Abdullah, M. F. B., Tayebi, L., Wang, S., Abdal-hay, A., & Xu, Y. (2026). Recent Advances of Bioceramics, Fundamental Properties and Future Perspective in Biomedical Applications–A Review. Materials Today Sustainability, 101418.

24. Tanvir, M. A. H., Khaleque, M. A., Kim, G. H., Yoo, W. Y., & Kim, Y. Y. (2024). The role of bioceramics for bone regeneration: history, mechanisms, and future perspectives. Biomimetics, 9(4), 230.

25. Rajendran, A. K., Anthraper, M. S. J., Hwang, N. S., & Rangasamy, J. (2024). Osteogenesis and angiogenesis promoting bioactive ceramics. Materials Science and Engineering: R: Reports, 159, 100801.

26. Chen, Q., Liang, S., & Thouas, G. A. (2020). Biodegradable materials for bone defect repair. Military Medical Research, 7(1), 1-17.

27. Podaropoulos, L., Veis, A. A., Papadimitriou, S., Alexandridis, C., & Kalyvas, D. (2020). A head-to-head comparison of the degradation rate of resorbable bioceramics: Calcium sulfate versus tricalcium phosphate. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 31(2), 24.

28. Baino, F., Kargozar, S., & Verné, E. (2024). Advanced bioceramics and composites for bone tissue engineering: Breaking the brittleness barrier via additive manufacturing. Acta Biomaterialia, 174, 22-45.

29. Eraković, S., Veljović, D., & Bajić, D. (2025). Functional surface modifications and smart ion-release systems in next-generation bioceramic coatings. Surface and Coatings Technology, 492, 115-132.

30. Thangavel, M., & Elsen Selvam, R. (2022). Review of physical, mechanical, and biological characteristics of 3D-printed bioceramic scaffolds for bone tissue engineering applications. ACS Biomaterials Science & Engineering, 8(12), 5060-5093.

31. Vaiani, L., Boccaccio, A., Uva, A. E., Palumbo, G., Piccininni, A., Guglielmi, P., ... & Ballini, A. (2023). Ceramic materials for biomedical applications: an overview on properties and fabrication processes. Journal of functional biomaterials, 14(3), 146.

32. Galván-Chacón, V. P., & Habibovic, P. (2017). Deconvoluting the bioactivity of calcium phosphate-based bone graft substitutes: strategies to understand the role of individual material properties. Advanced Healthcare Materials, 6(13), 1601478.

33. Sen, A., Banerjee, N., Biswas, A. R., Ghosh, T. K., Samanta, A., Kumar, M., ... & Maity, S. R. (2023). Standards of mechanical, physical, chemical, and biological properties of bioceramics. In Advanced Bioceramics (pp. 327-343). CRC Press.

34. Magnaudeix, A. (2022). Calcium phosphate bioceramics: From cell behavior to chemical-physical properties. Frontiers in Biomaterials Science, 1, 942104.

35. Shekhawat, D., Singh, A., Banerjee, M. K., Singh, T., & Patnaik, A. (2021). Bioceramic composites for orthopaedic applications: A comprehensive review of mechanical, biological, and microstructural properties. Ceramics International, 47(3), 3013-3030.

36. Heimann, R. B. (2013). Structure, properties, and biomedical performance of osteoconductive bioceramic coatings. Surface and Coatings Technology, 233, 27-38.

37. LeGeros, R. Z. (2002). Properties of osteoconductive biomaterials: calcium phosphates. Clinical Orthopaedics & Related Research, 395, 81-98.

38. Habibovic, P., Gbureck, U., Doillon, C. J., Bassett, D. C., van Blitterswijk, C. A., & Barralet, J. E. (2008). Osteoconduction and osteoinduction of low-temperature 3D printed bioceramic implants. Biomaterials, 29(7), 944-953.

39. Jin, P., Liu, L., Cheng, L., Chen, X., Xi, S., & Jiang, T. (2023). Calcium-to-phosphorus releasing ratio affects osteoinductivity and osteoconductivity of calcium phosphate bioceramics in bone tissue engineering. Biomedical engineering online, 22(1), 12.

40. Galván-Chacón, V. P., & Habibovic, P. (2017). Deconvoluting the bioactivity of calcium phosphate-based bone graft substitutes: strategies to understand the role of individual material properties. Advanced Healthcare Materials, 6(13), 1601478.

41. Brochu, B. M., Sturm, S. R., Kawase De Queiroz Goncalves, J. A., Mirsky, N. A., Sandino, A. I., Panthaki, K. Z., ... & Coelho, P. G. (2024). Advances in bioceramics for bone regeneration: a narrative review. Biomimetics, 9(11), 690.

42. Tanvir, M. A. H., Khaleque, M. A., Kim, G. H., Yoo, W. Y., & Kim, Y. Y. (2024). The role of bioceramics for bone regeneration: history, mechanisms, and future perspectives. Biomimetics, 9(4), 230.

43. Sonowal, L., Gautam, S., Mambiri, L. T., & Depan, D. (2025). Advancements of bioceramics in biomedical applications. Next Materials, 9, 101010.

44. Hamadouche, M., & Sedel, L. (2000). Ceramics in orthopaedics. The Journal of Bone & Joint Surgery British Volume, 82(8), 1095-1099.). Mala, R., & Celsia, A. R. (2018). Bioceramics in orthopaedics: A review. Fundamental Biomaterials: Ceramics, 195-221.

45. Wang, H., Sanghvi, G., Arefpour, A., Alkhayyat, A., Soheily, A., Jabbarzare, S., ... & Baghaei, S. (2024). Using hardystonite as a biomaterial in biomedical and bone tissue engineering applications. Tissue and Cell, 91, 102551.

46. Khodaei, M., & Nadi, A. (2024). Bredigite bioceramic: A promising candidate for bone tissue engineering. Silicon, 16(13), 5213-5230.

47. Piconi, C., Maccauro, G., Muratori, F., & Del Prever, E. B. (2003). Alumina and zirconia ceramics in joint replacements. Journal of Applied Biomaterials and Biomechanics, 1(1), 19-32.

48. Maccauro, G., Iommetti, P. R., Raffaelli, L., & Manicone, P. F. (2011). Alumina and zirconia ceramic for orthopaedic and dental devices. Biomaterials applications for nanomedicine, 3, 485.

49. Bal BS, Rahaman MN. Silicon Nitride Bioceramics in Healthcare. Journal of the European Ceramic Society. 2021;41(15):7747–7778.

50. Pezzotti, G., & McEntire, B. J. (2024). The future of silicon nitride: biomedical applications and beyond. In Silicon nitride bioceramics (pp. 415-431). Cham: Springer International Publishing.

51. Atia, G. A. N., Mohamed, S. Z., Halim, H. A., Ghobashy, M. M., Foda, T., Shalaby, H. K., ... & Khan, F. S. (2024). Advances in Bioceramic silicates for therapeutic, and regenerative Dentofacial reconstruction. Ceramics International, 50(13), 22184-22208.

52. Sheikh, Z., Nayak, V. V., Daood, U., Kaur, A., Moussa, H., Canteenwala, A., ... & Witek, L. (2024). Three-dimensional printing methods for bioceramic-based scaffold fabrication for craniomaxillofacial bone tissue engineering. Journal of functional biomaterials, 15(3), 60.

53. Cinici, B., Yaba, S., Kurt, M., Yalcin, H. C., Duta, L., & Gunduz, O. (2024). Fabrication strategies for bioceramic scaffolds in bone tissue engineering with generative design applications. Biomimetics, 9(7), 409.

54. Jalaludeen, A. M., Ramakrishnan, R., Gunasekaran, S. S., Thajuddin, N., Selvam, M. K., Ali, B. M. S., ... & Sundaram, T. (2024). Advancements in hydroxyapatite synthesis and surface modifications for emerging biomedical applications. Inorganic Chemistry Communications, 170, 113414.

55. Nguyen, N. H., Lu, Z., Elbourne, A., Vasilev, K., Roohani, I., Zreiqat, H., & Truong, V. K. (2024). Engineering antibacterial bioceramics: Design principles and mechanisms of action. Materials Today Bio, 26, 101069.

56. Vallet-Regi, M., & Salinas, A. J. (2021). Mesoporous bioactive glasses for regenerative medicine. Materials Today Bio, 11, 100121.

57. Singh, J., Chatha, S. S., & Singh, H. (2021). Synthesis and characterization of plasma sprayed functional gradient bioceramic coating for medical implant applications. Ceramics International, 47(7), 9143-9155.

58. Nguyen, H. P., Nguyen, Q. N. D., Le Phong, T. N., Luu, N. H. T., Moonshi, S. S., Trieu, H. N., ... & Phan, V. G. (2025). A programmable shape memory bioscaffold incorporating doxorubicin for postoperative chemotherapy and enhanced bone regeneration. Journal of Materials Chemistry B, 13(40), 12949-12966.

59. Prakasam, S., Balakrishnan, N., Kirthickram, T. R., & Deepak, S. (2023, May). Design and development of AI-powered healthcare WhatsApp chatbot. In 2023 2nd International Conference on Vision Towards Emerging Trends in Communication and Networking Technologies (ViTECoN) (pp. 1-6).

BÖLÜM 15

UHT Sütlerde ve UHT Organik Sütlerde Aflatoksin M_1 Varlığının Araştırılması

Nusret Deniz Okay [1]
Yakup Can Sancak [2]

[1] Veteriner Hekim, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Sağlık, Bilimleri Enstitüsü, Besin Hijyeni ve Teknolojisi Anabilim Dalı, Van, Türkiye, ORCID: 0000-0002-2283-8299
[2] Prof. Dr., Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Veteriner Fakültesi, Besin Hijyeni ve Teknolojisi Anabilim Dalı, Van, Türkiye, ORCID: 0000-0003-4490-9606

1. Giriş

Süt, canlının gelişip büyüyebilmesi ve sağlığını yaşam boyu koruyabilmesi için ihtiyaç duyulan besin öğelerini içeren çok önemli gıda maddesidir. İnsanoğlunun hayatında önemli bir yeri olan bu gıda maddesi, yeterli ve dengeli beslenme için elzem olan hayvansal kaynaklı protein, yağ, laktoz, vitamin ve mineral maddelerin çoğunu yeterli oranda yapısında bulunduran ender gıdaların başında gelmektedir (Koyuncu ve ark., 2014). Süt ve süt ürünleri tüketicilerin beslenme ihtiyaçlarını karşılamakla birlikte kemik erimesi, diş çürümesi, obezite, hipertansiyon, kardiyovasküler hastalıklar ve kolorektal kanser gibi çeşitli hastalıkların önlenmesinde de etkilidir (Uenishi, 2006; Jaffiol, 2008).

Türk Gıda Kodeksi İçme Sütleri Tebliği (2019)'nde çiğ süt "Çiftlik hayvanlarının meme bezlerinden salgılanan, 40 ºC'nin üzerinde ısıtılmamış veya eşdeğer etkiye sahip herhangi bir işlem görmemiş süt (inek sütü, koyun sütü, manda sütü, keçi sütü)"; UHT süt ise, UHT işlemi (135 ºC'den az olmayan kısa süreli yüksek sıcaklıkta sütün sürekli akışını içeren, aseptik koşullarda kapatılmış ambalajların oda sıcaklığında muhafaza edilmesi halinde, üründe canlı mikroorganizma veya gelişim kabiliyetine sahip sporların olmamasını sağlayan ısıl işlem) uygulandıktan sonra aseptik koşullarda ambalajlara dolum yapılarak üretilen içme sütü olarak tanımlanmaktadır.

Günümüzde içme sütü olarak genellikle UHT sütlerin tercih edilmesinde depolama ve dağıtım aşamalarında soğuk zincire gerek duyulmaması, aseptik şartlarda hazırlanıp paketlenmesi ile raf ömrünün daha uzun olması gibi faktörler etkili olmaktadır (Ergin ve Küçükçetin, 2018; Yangılar, 2020).

Son yıllarda tüketicilerin gıda kalitesi ve gıdaların güvenirliğine karşı tutumları, merdiven altı işletmelerde yapılan üretimler ve piyasada doğal olmayan veya hileli olan gıdaların sayılarının artmasına bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle tüketiciler çevreye daha duyarlı, özgün ve yöresel olarak üretilen doğal gıdaları araştırmaya başlamışlardır. İnsanoğlunun sağlık kaygılarıyla günümüzde birçok gıda maddesini geliştirmesi, organik olarak üretilen gıdaların hayatımızda yerini almasına neden olmuş (Rembiałkowska ve Średnicka, 2009) ve Türkiye'de de yaygınlaşan organik gıda sektörüne 2005 yılında UHT organik sütler girmiştir. Kara (2006), organik süt ve süt ürünleri üretiminde, organik bitkisel üretimden organik hayvansal üretime kadar bütün aşamalar arasında sıkı bir ilişki bulunduğunu, organik olarak üretilen süt ve süt ürünleri üretiminin ancak organik bitkisel üretim yapılarak organik hayvancılığın gerçekleştirilmesiyle mümkün olabileceğini ve bu şekilde izlenerek/denetlenerek üretimi yapılan ve sertifikalandırılan sütlerin organik süt olarak adlandırılabileceğini ifade etmektedir. Kısaca organik süt; hayvan refahının ve koruyucu hekimliğin göz önünde bulundurulduğu, genetiği değiştirilmiş organizmalar kullanılmadan yetiştirilen hayvanlardan elde edilen, içerisinde hormon, antibiyotik, sentetik kimyasallar, pestisit kalıntısı ve küf

bulundurmayan, yasal sınırların altında toplam mikroorganizma içeren ve beslenme değeri diğer sütlere göre daha yüksek olan sağlıklı ve güvenilir bir süttür (Koyuncu ve ark., 2014).

Süt, insan sağlığının korunması ve canlının büyüyüp gelişebilmesi için ihtiyaç duyulan birçok mikro ve makro besin öğelerini içeren, ayrıca canlının gıda ihtiyacını uzun bir süre tek başına karşılayabilecek yetkinliğe sahip olan oldukça besleyici bir gıda maddesidir. Bu kadar faydalı özelliklerinin yanında süt aynı zamanda aflatoksin M_1 (AFM_1) gibi sağlığı tehdit eden gıda kontaminantlarının da taşıyıcısı olabildiğinden dolayı bu sütleri tüketen bireylerde çeşitli fizyolojik sorunlar görülebilmektedir (Iqbal ve ark., 2015; Mehenktaş, 2019).

Süt ve süt ürünlerinin tüketimi ile halk sağlığı arasında önemli bir ilişki bulunmakta ve hayvancılık sektörünün gelişmesi de süt kalitesini olumlu yönde etkilemektedir. Bu nedenle çiftlik hayvanlarının sağlıksız yemlerle beslenmesi, çiftlik hayvanlarının sağlığını olumsuz bir şekilde etkileyebildiği gibi üretilen süt ve ürünlerinin yapısında da halk sağlığını tehdit eden kontaminasyonlara neden olmaktadır. Süt ve süt ürünlerini tehdit eden en büyük sorunlardan biri mikotoksin kontaminasyonudur (Abdali ve ark., 2020).

Aspergillus, *Penicillium*, *Fusarium*, *Claviceps* ve *Alternaria* gibi mantar cinslerinin ikincil metabolizması sonucu meydana gelen mikotoksinler, farklı kimyasal yapılara ve düşük molekül ağırlığına sahip olan doğal toksinlerdir (Steyn ve Stander, 1999). Mikotoksinler insan ve hayvanlarda akut zehirlenmelerden kanserojenik etkilere kadar çok güçlü toksik etkiler oluştururlar ve bu toksik etkiler mikotoksikozis olarak adlandırılır. Mikotoksikozis vakalarının klinik belirtilerinin şiddetini belirleyen çok önemli unsurlar vardır. Bunlar; toksinin tipi, miktarı ve çeşidi, toksine maruz kalan canlının yaşı, cinsiyeti, kilosu, fizyolojisi ve beslenme durumudur (Peraica ve ark., 1999).

Hayvansal ve bitkisel gıdaların tüketilmesiyle insan vücuduna nüfuz eden mikotoksinler, öncelikli olarak karaciğer ve böbreği hedef alarak bu organlarda bozukluklara neden olmaktadır. Mikotoksinlerin sinir ve bağışıklık sistemlerinde de bozukluklara yol açtığı, ayrıca deri nekrozu gibi çok ciddi sağlık problemlerine neden olduğu bilinmektedir. Bu problemlere neden olan mikotoksinleri *Aspergillus*, *Fusarium* ve *Penicillium* cinsleri üretmektedir (Sweeney ve Dobson, 1998). Özellikle *Aspergillus* cinsinden olan *Aspergillus flavus*, *Aspergillus parasiticus* ve *Aspergillus nomius*'un ürettiği aflatoksin B_1 (AFB_1); insanlarda karsinojenik, teratojenik ve mutajenik etkilere sebep olabilen toksik mikotoksinlerdir. *Aspergillus flavus* yalnızca AFB_1 ve aflatoksin B_2 (AFB_2) üretebilirken, *Aspergillus parasiticus*'un ise AFB_1, AFB_2, aflatoksin G_1 (AFG_1) ve aflatoksin G_2 (AFG_2)'yi de üretebildiği belirtilmektedir (Frisvad ve ark., 2005; Shephard, 2009).

Mikotoksinler içerisinde önemli bir yere sahip olan aflatoksinler günümüzde üzerinde en çok çalışma yapılan ve bu sebeple de en fazla tanınan doğal

kirleticilerdir. Aflatoksinler kuvvetli bir kanserojen etkiye sahip olduklarından ve en çok etkilediği organların başında da karaciğer geldiğinden dolayı bu toksine hepatoksin adı verilmiştir (Mendonça ve Venâncio, 2005).

Süt ve süt ürünleri aflatoksin kalıntısı yönünden riskli gıdalar arasıda yer alır ve bu ürünleri tüketen insanlarda da önemli sağlık problemleri görülür. Süt ve süt ürünlerinin aflatoksinlerle kontamine olmasındaki en önemli neden, AFB_1 ve AFB_2 mikotoksinleriyle kontamine olan yemlerin hayvanlar tarafından tüketilmesidir. Kontamine yemlerin tüketilmesiyle AFB_1 ve AFB_2, süt hayvanlarının karaciğerinde metabolize olarak AFM_1 ve AFM_2'ye dönüşmektedir (Coppock ve Christian, 2007). Daha nadir görülmesine rağmen kontaminasyona neden olan ikinci sebep ise süt ve süt ürünlerinin direkt olarak küflerle kontaminasyonudur (Weimer, 2001). Bu toksinlerin yemlerden süte geçmesinde hayvanın sağlığı, beslenme durumu, sindirim hızı, hepatik biyotransformasyon kapasitesi ve süt verimi gibi çeşitli beslenme ve fizyolojik faktörler etkili olmaktadır (Veldman ve ark., 1992).

Isıya karşı oldukça dirençli olan AFM_1'in süt ve süt ürünlerindeki miktarı ile toksisitesi sterilizasyon, pastörizasyon, fermentasyon, soğukta veya dondurarak depolama ve kurutma gibi süt işleme prosesleriyle tamamen inaktive edilememektedir (WHO, 1993). Süt, özellikle bebekler ve çocuklar tarafından sevilerek tüketilen çok besleyici bir gıda maddesidir. Genel olarak insanoğlunun tüketiminde de birincil besin maddelerinden biri olduğu için, bu gıdadaki AFM_1 insidansının kontrolü büyük önem taşımaktadır (Becker-Algeri ve ark., 2016). Sütlerdeki aflatoksin miktarının düşürülebilmesi için sülfit, bisülfit, hidrojen peroksit, benzol peroksit, laktoperoksidaz ve ultraviole radyasyon muamelesi gibi kimyasal yöntemlerin yanı sıra bentonit benzeri partiküllerle absorbsiyonu üzerine fiziksel metotlar da denenmiştir (Ryser, 2001). Bu toksinlerle ilgili sağlık risklerini en düşük seviyeye indirebilmek amacıyla yasal düzenlemeler yapılmış, Commission Regulation (2010) ve Türk Gıda Kodeksi (2011)'nde çiğ süt, ısıl işlem görmüş süt ve süt bazlı ürünlerin üretiminde kullanılan sütler için AFM_1 maksimum limit değeri 0.05 µg/kg olarak belirtilmiştir.

Aflatoksinlerin tespit edilmesinde günümüzde İnce Tabaka Kromatografisi (Thin Layer Chromatography, TLC), Yüksek Basınçlı Sıvı Kromatografisi (High Performance Liquide Chromatography, HPLC), Performance Liquide Chromatography, HPLC, Kapiler Elektroforez Kütle Spektrometresi (Capillary Electrophoresis-Mass Spectrometry, CE-MS) ve Gaz Kromatografisi Kütle Spektrometresi (Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS) gibi yöntemler kullanılmaktadır.

1.1. Mikotoksinler ve Mikotoksikozis

Süt ve süt ürünlerini tehdit eden en büyük sorunlardan biri mikotoksin kontaminasyonudur. Mikotoksinler, temel olarak *Fusarium*, *Penicillium* ve *Aspergillus* türleri tarafından belirli sıcaklık ve nem koşulları altında üretilen

doğal kirleticiler ve küflerin ikincil toksik metabolitleridir (Fallah, 2010). İnsan ve hayvanların sağlığı açısından en önemli mikotoksin türleri aflatoksinler, fumonisinler, okratoksinler, trikotesenler, zearalenon, sitrinin, penitrem, sterigmatosistin, rubratoksinler, spirodesmin, fusarik asit, patulin ve ergot alkoloidleridir. Mikotoksin terimi; Yunanca mykes (mantar) ve Latince toxicum (zehir) kelimelerinin birleşmesiyle oluşmuştur. Çevre koşulları uygun olduğunda mikotoksin üreten 400 civarında küf türü olduğu bilinmekte ve bu türlerden *Fusarium* hasat öncesi veya sonrasında, *Penicillium* ve *Aspergillus* türleri ise kurutma sırasında ve sonrasındaki depolama aşamalarında gıdalara bulaşarak toksin oluşturabilmektedir (Creppy, 2002; Kaya, 2014).

Mikotoksinlerle kontaminasyona uğramış gıdaların insanlar tarafından tüketilmesiyle "mikotoksikozis" adı verilen zehirlenmeler oluşmaktadır. Mikotoksinler arasında *A. flavus* ve *A. parasiticus* en güçlü toksik etkiye sahiptir. İnsanlar tarafından yoğun olarak tüketilen arpa, mısır, buğday, pirinç, yağlı tohumlar, baharatlar, yerfıstığı, fındık, kuru meyveler, süt ve peynir mikotoksin yönünden riskli gıdalardır (Creppy, 2002; Coppock ve Christian, 2007; Kaya, 2014).

Mikotoksinler, çavdar mahmuzu olarak da bilinen ergotizm hastalığına neden olmaktadır. Yüksek ateş, el, kol, ayak, bacak ve parmaklarda nekrozlar oluşturan bu hastalığa *Claviceps purpure*'nın toksini olan "ergot alkoloidi" neden olmaktadır. Orta Çağ'da "Aziz Antonius Humması" adı verilen bu hastalık, karıncalanma ve uyuşma semptomları gösteren bir sinir hastalığı olarak nitelendirilmiş ve Rusya'nın Orenburg bölgesinde de 1942-1944 yılları arasında binlerce insanın ölümü ile sonuçlanan "Alimentary Toxic Aleukia" (ATA) olarak tarihe geçmiştir. Rusya'da görülen bu mikotoksikozis olayı, savaş nedeniyle hasat edilemeyen ve tarlada bırakılan tahıllardan kaynaklanmıştır (Tunail, 2000).

Genellikle tarımsal gıdalar ve yemlerle alınan mikotoksinler; karaciğer, böbrek ve immun sisteminde harabiyetlere neden olmaktadır (Coppock ve Christian, 2007; Kaya, 2014). Karaciğere etki eden mikotoksinler "*hepatotoksik*", deriye etki eden mikotoksinler "*dermatoksik*", böbreklere etki eden mikotoksinler "*nefrotoksik*", sinir sistemine etki eden mikotoksinler "*nörotoksik*" ve bağışıklık sistemine etki eden mikotoksinler ise "*immunotoksik*" veya "*immunosupresif*" olarak tanımlanmaktadır. Mikotoksinlerin; kanserojenik, mutajenik, östrojenik, teratojenik ve halusinojenik etkileri de görülmektedir (Tunail, 2000).

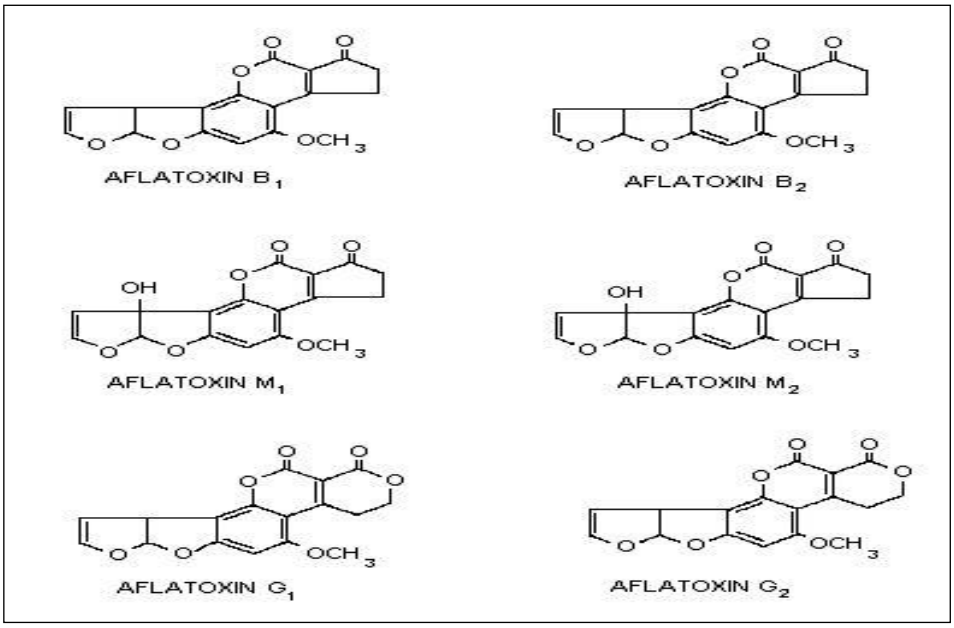
1.1.1. Aflatoksinler

Aflatoksinler, ilk olarak 1960 yılında İngiltere'de "Turkey-X Disease" olarak adlandırılan bir hastalıktan birkaç ay içinde 100.000'den fazla genç hindinin ölmesiyle keşfedilmiştir. Kısa süre sonra bu ölümlerin hindilerle sınırlı olmadığı, ördek yavrularının ve genç sülünlerin de bu hastalıktan etkilendiği görülmüş ve salgınlara Brezilya'dan köken alan küflenmiş yer fıstığı küspesinden izole edilen *Aspergillus flavus*'un neden olduğu ifade edilmiştir (Bennett, 2010).

Aflatoksinler gıdalar ile yemlerin hasat, kurutma, işleme, depolama ve nakliye aşamalarında oluşabildiği gibi ürünlerin tarlada gelişimi sırasında da oluşabilmektedir. Aflatoksin oluşumundaki önemli etkenler; ortamın nisbi nemi ve sıcaklığı ile ürünlerdeki mevcut rutubet miktarıdır (Tunail, 2000; Kaya, 2014).

Hepatosellüler karsinom gelişiminde *A. flavus*, *A. parasiticus*, *A. nomius*, *A. ochraceoroseus*, *A. bombycis* ve *A. pseudotamari* tarafından üretilen mikotoksinler etkilidir. AFB_1, AFB_2, AFG_1 ve AFG_2 bitki kökenli aflatoksinler olup, bunların metabolitleri olan AFM_1 ve AFM_2 hayvansal kaynaklı kontamine gıdalardan izole edilen en yaygın aflatoksin türleridir (Kaya, 2014).

Aflatoksinler TLC'de ultraviyole (UV) ışınları altında meydana getirdikleri renklere göre AFB_1, AFB_2, AFG_1, AFG_2, AFM_1 ve AFM_2 olmak üzere başlıca altı gruba ayrılmaktadır. 425-450 nm dalga boyundaki UV ışınları altında mavi fluoresans renk verenler AFB_1 ve AFB_2, yeşil fluoresans renk verenler ise AFG_1 ve AFG_2 olarak adlandırılmaktadır. Aflatoksinli yemleri tüketerek vücuda alınan AFB_1 ve AFB_2, hidroksile olarak AFM_1 ve AFM_2 şeklinde süt ile atıldığından bu toksinlere süt toksinleri (milk toxin) adı verilmiştir. AFM_1 ve AFM_2 ise TLC'de UV ışınları altında mavi renk verirler (Van Egmond, 1994). Bazı aflatoksinlerin kimyasal yapıları Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Bazı aflatoksinlerin kimyasal yapıları (Betina, 1989).

Aflatoksinler, polar organik çözücülerde ve suda çözünebilmelerine rağmen polar olmayan çözücülerde çözünmezler. Sudaki çözünürlükleri 10-20 mg/l arasındadır. Amonyak, hiporklorit ve sodyum bisülfit gibi kimyasal maddelerle parçalanabilirlerken, normal gıda işleme sıcaklıklarında parçalanmazlar. Hekzan,

petrol eteri ve izooktan gibi yağ çözücüleri dışındaki metanol, kloroform, benzol ve asetonitrilde daha iyi çözünürler (Kaya ve ark., 2002). Aflatoksinlerin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Aflatoksinlerin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri (Kumar, 2018).

Aflatoksin	Moleküler Formülü	Ağırlığı (g/mol)	Erime Noktası (°C)	Maksimum Floresans (nm)	Floresan Renk (UV 365 nm)
AFB_1	$C_{17}H_{12}O_6$	312	268-269	425	Mavi
AFB_2	$C_{17}H_{14}O_6$	314	286-289	425	Mavi
AFG_1	$C_{17}H_{12}O_7$	328	244-246	450	Yeşil
AFG_2	$C_{17}H_{14}O_7$	330	237-240	450	Yeşil
AFM_1	$C_{17}H_{12}O_7$	328	299	425	Mavi
AFM_2	$C_{17}H_{14}O_7$	330	293	425	Mavi

nm: Nanometre; UV: Ultraviole.

1.2. Aflatoksinlerin Toksisitesi ve Halk Sağlığına Etkileri

Aflatoksinler, hayvan ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere neden olabilen kanserojenik, mutajenik, teratojenik, hepatotoksik ve immunsüpresif özelliklere sahip güçlü bir mikotoksin grubudur. Bunların canlılarda oluşturduğu akut ve kronik mikotoksikozlar da aflatoksikozis olarak adlandırılmaktadır (Coppock ve Christian, 2007; Kaya, 2014).

Aflatoksinler hayvanlarda karaciğer hasarı, tümör, mutagenez ve malformasyon gibi semptomlara yol açabilmektedir. Ayrıca bağışıklık sisteminin zayıflamasına, büyümenin yavaşlamasına, süt üretiminin azalmasına ve hayvanlarda abort gibi üreme fizyolojisinde ciddi komplikasyonlara da neden olmaktadır (Coppock ve Christian, 2007).

İnsan ve hayvanlar için toksik ve en fazla karsinojenik etkiye sahip olan, ayrıca gıda ve yemlerde çok sık bulunan aflatoksin AFB_1'dir. İnsan ve hayvanlarda aflatoksinlerin toksik etkileri AFB_1> AFM_1> AFG_1> AFB_2> AFM_2> AFG_2 şeklinde sıralanmaktadır (Jay, 1992; Kumar ve ark., 2017).

Hepatotoksik ve kanserojen etkileri nedeniyle AFB_1 ve AFM_1, Uluslararası Kanser Araştırma Ajansı (International Agency for Research on Cancer, IARC) tarafından kanserojen bileşikleri olarak sınıflandırılmaktadır (IARC, 2002).

Aflatoksinlerin toksisite derecesini; aflatoksine maruziyet durumu, kişinin yaşı ve beslenme durumu faktörleri etkilemektedir. İnsanlar aflatoksinlere doğrudan mesleki maruziyet sonucu maruz kalabileceği gibi özellikle de kontamine yemlerle beslenmiş hayvanlardan elde edilen ürünler aracılığıyla da maruz kalabilirler. Et, süt ve yumurta ile alınan çok az miktarlardaki AFB_1 karaciğer ve diğer dokulara geçebilmektedir (Busby ve Wogan, 1984).

1.3. Süt ve Süt Ürünlerinin AFM_1 İle İlişkisi

Süt toksini olarak da bilinen AFM_1, sütte bulunabilecek en tehlikeli kalıntılardandır. AFM_1; AFB_1 ile kontamine yemleri tüketen hayvanların sütlerinde bulunan, mikrozomal sitokrom P450 ile hepatik düzeyde biyotransformasyona uğramış AFB_1'in monohidroksil türevidir (Galvano ve ark., 1996; Flores-Flores ve ark., 2015). Sütteki AFM_1 içeriği ile yemlerle alınan AFB_1 arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Kontaminasyonda mevsim, çevresel faktörler ve hayvanın genetik durumu etkili olmaktadır (Kaya, 2014).

Süt ve süt ürünlerindeki AFM_1 miktarı, kış aylarında daha fazla olmaktadır. Bunun nedeni hayvanların yaz aylarında meralarda taze yeşil yemle beslenebilmesi, kış aylarında ise taze yeşil yemlerin bulunmamasına bağlı olarak daha fazla mısır ve buğday gibi tahıl ürünlerine dayalı konsantre karma yemle beslenmeleridir. Ayrıca kış mevsiminde süt veriminin düşük olmasından kaynaklı olarak AFM_1 düzeyi sütlerde daha yoğun olarak bulunmaktadır (Galvano ve ark., 1996; Bakırcı, 2001; Coşkun ve Şanlı, 2016; Madalı ve Ayaz, 2017).

Aflatoksinlerin ısıya karşı dirençleri yüksektir, pastörizasyon ve sterilizasyon dereceleri aflatoksinlerin inaktivasyonunda yeterli gelmemektedir ve yapılan bazı çalışmalarda da (Tekinşen ve Eken, 2008; Atasever ve ark., 2011; İşleyici ve ark., 2011; Abdali ve ark., 2020; Daou ve ark., 2020) peynir, yoğurt ve dondurma gibi süt ürünlerinde AFM_1'in farklı miktarlarda tespit edildiği bildirilmiştir.

1.4. AFM_1 İle İlgili Yasal Düzenlemeler

Gıdalarda ve yemlerde mikotoksinlere bağlı olarak oluşan kontaminasyonlar, gıda güvenliğini tehdit ederek halk sağlığını olumsuz bir şekilde etkilemekte ve sektörde çok ciddi ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Aflatoksinlerin sağlık ve ekonomi üzerinde oluşturduğu zararlı etkilerinden dolayı ulusal ve uluslararası makamlar tarafından önlemler alınarak gıdalarda bulunabilecek maksimum aflatoksin miktarları belirlenmiştir. Bazı ülkelerde süt ve süt ürünlerinde bulunmasına izin verilen maksimum AFM_1 miktarları (µg/kg) Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Bazı ülkelerde süt ve süt ürünlerinde bulunmasına izin verilen maksimum AFM_1 miktarları (µg/kg) (Iqbal ve ark., 2015).

Mikotoksin	Ülke	Maksimum Limit	Gıdalar
AFM_1	Avusturya	0.05	Süt
		0.02	Tereyağı
		0.01	Pastörize devam sütü
		0.25	Peynir
		0.40	Süt tozu
	İsviçre	0.05	Süt
		0.25	Peynir
		0.02	Tereyağı
	ABD	0.50	Süt ve süt ürünleri
	Çek Cumhuriyeti	0.05	Süt
	Fransa	0.05	Süt
		0.03	Süt (3 yaş altı çocuklar)
	Bulgaristan	0.50	Süt
		0.10	Süt tozu
	Türkiye	0.05	Süt
		0.025	Bebek ve devam sütleri
	Arjantin	0.05	Süt
		0.50	Peynir
	Honduras	0.05	Süt
		0.25	Süt ürünleri
	Mısır	0.00	Süt ve süt ürünleri
	Nijerya	1.00	Süt
	İran	0.50	Süt

Türk Gıda Kodeksi (2011)'de çiğ süt, ısıl işlem görmüş süt ve süt ürünlerinin üretiminde kullanılan sütlerde bulunabilecek maksimum AFM_1 miktarı 0.05 µg/kg olarak belirtilmiştir.

1.5. AFM_1 İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Dünya'da ve Türkiye'de çeşitli süt ve süt ürünlerindeki AFM_1 varlığının incelendiği bazı çalışmaların bulguları aşağıda özetlenmiştir.

Martins ve Martins (2000) Portekiz'de bireysel çiftliklerden alınan 31 adet çiğ süt ve süpermarketlerden alınan 70 adet UHT süt örneğini (18 tam yağlı süt, 22 yarım yağlı süt, 30 yağsız süt) inceledikleri çalışmada, çiğ sütlerin % 80.6'sının, tam yağlı sütlerin % 94.4'ünün, yarım yağlı sütlerin % 90.9'unun ve yağsız sütlerin % 76.7'sinin AFM_1 ile kontamine olduğunu bildirmişlerdir. İnceledikleri çiğ sütlerde maksimum limit değeri (0.05 µg/l) aşan örneğin olmadığını, UHT sütlerde (yağlı ve yarım yağlı) ise sadece iki örneğin bu değeri aştığını ifade etmişlerdir.

Akdemir ve Altıntaş (2004) Ankara'da iki ayrı süt fabrikasına işlenmek üzere gelen 48 adet çiğ süt örneğini immunoaffinite kolon temizleme ve floresans dedektörlü HPLC cihazını kullanarak inceledikleri araştırmada, 34 örneğin (%

70.83) AFM_1 ile kontamine olduğunu ayrıca kontaminasyona uğrayan örneklerin 16 (% 33.3)'sında belirlenen AFM_1 miktarının Türk Gıda Kodeksi (2011)'nde belirtilen maksimum limit değeri aştığını (0.05 µg/l) bildirmişlerdir.

Çelik ve ark. (2005) ELISA yöntemini kullanarak inceledikleri 85 adet pastörize süt örneğininin % 88.23'ünün AFM_1 ile kontamine olduğunu ve % 64'ünde belirlenen AFM_1 miktarının Türk Gıda Kodeksi (2011)'nde belirtilen maksimum limit değerin (0.05 µg/l) üzerinde olduğunu bildirmişlerdir.

Unusan (2006) İç Anadolu Bölgesi'nin farklı illerinden gelen 129 adet UHT (tam yağlı) süt örneğinde ELISA yöntemiyle AFM_1 miktarlarını inceledikleri çalışmada, örneklerin 75 (% 58.1)'inin AFM_1 ile kontamine olduğunu ve bunların 61 (% 47)'inde belirlenen AFM_1 miktarının Commission Regulation (2010)'da belirtilen maksimum limit değeri (50 ng/l) aştığını ifade etmiştir.

Gürbay ve ark. (2006) Ankara'da 24'ü UHT süt ve 3'ü pastörize süt olmak üzere toplam 27 adet süt örneğini HPLC yöntemi ile inceledikleri çalışmada, tüm örneklerin 16 (% 59.3)'sında AFM_1 belirlendiğini, sadece 1 (% 3.7) UHT süt örneğinde belirlenen AFM_1 miktarının Commission Regulation (2010) ve Türk Gıda Kodeksi (2011)'nde belirtilen maksimum limit değeri (0.05 µg/l) aştığını bildirmişlerdir.

Kantemir (2007) Ağrı'da ELISA tekniğini kullanarak 156 adet çiğ süt ve 156 adet UHT süt örneğini inceledikleri araştırmada, çiğ sütlerin 119 (% 76.28)'unda ve UHT sütlerin 129 (% 82.70)'unda çeşitli oranlarda AFM_1 tespit edildiğini, çiğ süt örneklerinin 39 (% 24.99)'unda ve UHT süt örneklerinin 27 (% 17.30)'sinde belirlenen AFM_1 miktarının Türk Gıda Kodeksi (2011)'nde belirtilen maksimum limit değeri (0.05 µg/l) aştığını ifade etmiştir.

Kamkar (2008) İran'da ELISA yöntemini kullanarak 52 adet UHT süt örneğini incelediği araştırmada, örneklerin tamamında AFM_1 tespit edildiğini bildirmiş ve bu örneklerin % 79.92'sinde belirlenen AFM_1 miktarının bazı Avrupa ülkeleri tarafından kabul edilen maksimum limit değeri (50 ng/kg) aştığını belirtmiştir.

Tekinşen ve Eken (2008) İstanbul, İzmir, Konya, Edirne ve Tekirdağ illerinden alınan 100 adet UHT süt örneğini ELISA yöntemiyle inceledikleri çalışmada, örneklerin % 67'sinin AFM_1 içerdiğini ve bunların 31'inde belirlenen AFM_1 miktarının Commission Regulation (2010) ve Türk Gıda Kodeksi (2011)'nde belirtilen maksimum limit değeri (0.05 µg/l) aştığını bildirmişlerdir.

Çeçen (2009) Van'da farklı yerlerdeki meralarda beslenen hayvanlardan alınan 31 adet ve Ankara'da farklı ahırlarda kesif yemle beslenen hayvanlardan alınan 30 adet olmak üzere toplam 61 adet çiğ süt örneğini immunoafinite kolon kullanarak floresan dedektörlü HPLC yöntemiyle incelediği çalışmada, meralarda beslenen hayvanlardan alınan sütlerin 1 (% 3.22)'inin ve ahırlarda

beslenen hayvanlardan alınan sütlerin 23 (% 76.66)'ünün AFM_1 ile kontamine olduğunu bildirmiştir.

Gündinç ve Filazi (2009) Bursa'da satışa sunulan 50 adet tam yağlı UHT süt örneğini ELISA yöntemiyle inceledikleri çalışmada, örneklerin tamamında AFM_1 tespit edildiğini ve bu örneklerin 10 (% 20)'unda belirlenen AFM_1 miktarının Commission Regulation (2010) ve Türk Gıda Kodeksi (2011)'nde belirtilen maksimum limit değeri (0.05 µg/l) aştığını bildirmişlerdir.

Heshmati ve Milani (2010) İran'da 210 adet UHT süt örneğini ELISA yöntemi ile inceledikleri araştırmada, örneklerin 116 (% 55.2)'sının AFM_1 kontaminasyonuna maruz kaldığını, en yüksek miktarın (0.249 µg/l) şubat ayında alınan örneklerde, en düşük miktarın (0.008 µg/l) ağustos ayında alınan örneklerde rastlandığını ve bu örneklerin 70'inde belirlenen AFM_1 miktarının Commission Regulation (2010)'da belirtilen maksimum limit değeri (0.05 µg/l) aştığını bildirmişlerdir.

Lee ve ark. (2009) Güney Kore'de 100 adet çiğ süt örneğini HPLC yöntemiyle inceledikleri çalışmada, örneklerin 48'inde düşük düzeylerde (0.002-0.08 µg/l) AFM_1 tespit edildiğini, örneklerde ortalama AFM_1 miktarının 0.026 µg/l olarak belirlendiğini ve hiçbir örnekte belirlenen AFM_1 miktarının Kore Hükümeti tarafından belirtilen maksimum limit değeri (0.5 µg/l)'yi aşmadığını belirtmişlerdir.

Shundo ve ark. (2009) süt tozu, pastörize süt ve UHT sütlerden oluşan toplam 125 örneğin AFM_1 miktarını immuno affinite kolon kullanarak HPLC-FLD yöntemiyle (deteksiyon limiti 10 ng/kg) inceledikleri araştırmada, örneklerin 119 (% 95.2)'unda 10-200 ng/kg arasında değişen miktarlarda AFM_1 tespit edildiğini ve ortalama miktarın 31 ng/kg olarak belirlendiğini bildirmişlerdir.

Atasever ve ark. (2010) Erzurum'da 150 adet UHT süt örneğini kompetetif ELISA yöntemiyle inceledikleri araştırmada, örneklerin 89 (% 59)'unun AFM_1 içerdiğini, 16 örnekte (% 10.7) belirlenen AFM_1 miktarının Commission Regulation (2010) ve Türk Gıda Kodeksi (2011)'nde belirtilen maksimum limit değeri (0.05 µg/l) aştığını bildirmişlerdir.

Delialioğlu ve ark. (2010) Mersin'de 39 adet keçi sütü, 53 adet çiğ inek sütü, 45 adet UHT süt ve pastörize süt olmak üzere toplamda 137 adet süt örneğini HPLC yöntemiyle inceledikleri çalışmada, keçi sütlerinin 14 (% 35.8)'ünde, inek sütlerinin 46 (% 86.7)'sında ve UHT sütlerin 33 (% 73.3)'ünde AFM_1 belirlendiğini, keçi sütlerinin 4 (% 10.2)'ünde, inek sütlerinin 39 (% 73.5)'unda ve UHT sütlerin ise 1 (% 2.2)'inde belirlenen AFM_1 miktarının Türk Gıda Kodeksi (2011)'nde belirtilen maksimum limit değeri (0.05 µg/l) aştığını bildirmişlerdir.

Fallah (2010) İran'da 116 adet pastörize süt ve 109 adet UHT süt olmak üzere toplamda 225 ticari süt örneğini inceledikleri çalışmada, toplamda 151 (% 67.1)

örneğin AFM_1 içerdiğini, pastörize sütlerin 83 (% 71.5)'ünde 5.8-528.5 ng/l arasında ve ortalama 52.8 ng/l, UHT sütlerin ise 68 (% 62.3)'inde 5.6-515.9 ng/l arasında ve ortalama 46.4 ng/l AFM_1 belirlendiğini, pastörize sütlerin 31 (% 26.7)'inde ve UHT sütlerin 19 (% 17.4)'unda belirlenen AFM_1 miktarının Commission Regulation (2010)'da belirtilen maksimum limit değeri (0.05 µg/l) aştığını bildirmiştir.

El Marnissi ve ark. (2012) Fas'ta 8 mandıradan alınan 48 adet çiğ süt örneğini HPLC yöntemiyle inceledikleri çalışmada, örneklerin 13 (% 27)'ünde 10-100 ng/l arasında değişen miktarlarda AFM_1 tespit edildiğini ve 4 (% 8) örnekte belirlenen AFM_1 miktarının Commission Regulation (2010)'da belirtilen maksimum limit değeri (0.05 µg/l) aştığını bildirmişlerdir.

İşleyici ve ark. (2012) Van'da süpermaketlerde tüketime sunulan 25 adet tam yağlı ve 25 adet yarım yağlı olmak üzere toplam 50 adet UHT sterilize inek süt örneğini ELISA yöntemi ile inceledikleri araştırmada, tam yağlı UHT sterilize inek sütünün 23 (% 92)'ünde AFM_1 miktarının 22.57-76.58 ng/l arasında ve ortalama 42.78±14.81 ng/l olarak belirlendiğini, 2 (% 8)'sinde ise 80 ng/l'den yüksek seviyede AFM_1 tespit edildiğini; yarım yağlı UHT sterilize inek sütünün 21 (% 84)'inde AFM_1 miktarının 7.61-58.78 ng/l arasında ve ortalama 38.73±10.98 ng/l olarak belirlendiğini, 4 (% 16)'ünde ise 80 ng/l'den yüksek seviyede AFM_1 tespit edildiğini bildirmişlerdir. Tam yağlı UHT sterilize süt örneklerinin 9 (% 36)'unda, yarım yağlı UHT sterilize süt örneklerinin ise 7 (% 28)'sinde belirlenen AFM_1 miktarının Türk Gıda Kodeksi (2011)'nde belirtilen maksimum limit değeri (0.05 µg/l) aştığını bildirmişlerdir.

Kabak ve Ozbey (2012) Çorum'da 40 adet UHT süt örneğini HPLC yöntemi ile inceledikleri çalışmada, örneklerin 8 (% 20)'inde 0.004-0.076 µg/l arasında AFM_1 tespit edildiğini ve bunların sadece 2 (% 5)'sinde belirlenen AFM_1 miktarının Commission Regulation (2010)'da belirtilen maksimum limit değeri (0.05 µg/l) aştığını bildirmişlerdir.

Saraç (2012) Ulusal markalara ait 22 adet UHT süt ve Giresun Bölgesi'nden toplanan 18 adet çiğ süt örneğini HPLC yöntemi ile incelediği araştırmada, AFM_1 dağılımının genel olarak 0.01-0.05 ng/ml arasında yoğunlaştığını, en yüksek AFM_1 miktarının UHT süt örneklerinde 0.098 ng/ml ve çiğ süt örneklerinde 0.048 ng/ml olarak tespit edildiğini, ayrıca UHT süt örneklerinden 2 (% 2.2)'sinde belirlenen AFM_1 miktarının yasal limit değeri olan 0.05 ng/ml'yi aştığını bildirmiştir.

Siddappa ve ark. (2012) Hindistan'da HPLC yöntemini kullanarak 45 adet sade ve aromalı UHT süt örneğini inceledikleri araştırmada, 21 sade UHT süt örneğinin tamamının (% 100) ve 24 adet aromalı UHT süt örneğinin 9 (% 37.5)'unun AFM_1 ile kontamine olduğunu belirlemişlerdir. Sade UHT sütlerin 8 (% 38)'inde ve aromalı UHT sütlerin 3 (% 12.5)'ünde belirlenen AFM_1

miktarının standartlarda belirtilen maksimum limit değeri (0.05 µg/l) aştığını belirtmişlerdir.

Duarte ve ark. (2013) Portekiz'de toplamda 40 adet pastörize ve UHT yarım yağlı sütü ELISA yöntemiyle inceledikleri çalışmada, örneklerin 11 (% 27.5)'inin AFM_1 kontaminasyona sahip olduğunu ve tüm süt örneklerinin 2 (% 5)'sinde belirlenen AFM_1 miktarının standartlarda belirtilen maksimum limit değeri (50 ng/l) aştığını bildirmişlerdir.

Picinin ve ark. (2013) Brezilya'nın Minas Gerais Bölgesi'nde süt çiftliklerinden üç farklı dönemde (kuru dönem, geçiş dönemi ve yağmurlu dönem) alınan 129 adet çiğ süt örneğini ELISA yöntemiyle ve konsantrasyonu 0.05 µg/l'nin üzerinde AFM_1 içeren örnekleri HPLC-FD doğrulama yöntemiyle inceledikleri çalışmada, bütün örneklerin AFM_1 ile kontamine olduğunu ve örneklerden 18 (% 13.95)'inde belirlenen AFM_1 miktarının Commission Regulation (2010)'da belirtilen maksimum limit değeri (0.05 µg/l) aştığını bildirmişlerdir.

Santini ve ark. (2013) İtalya'da yaptıkları çalışmada, 12 adet UHT süt örneğinin % 41.7'sinde AFM_1 tespit edildiğini ve bu örneklerin hiçbirinde standartlarda belirtilen maksimum limit değerin (0.05 µg/l) aşılmadığını bildirmişlerdir.

Suliman ve Abdala (2013) Sudan'ın Hartum Eyaleti'nde 143 adet taze inek sütünü ELISA yöntemiyle inceledikleri çalışmada, örneklerin tamamının AFM_1 içerdiğini bildirmişler ve bunların 141 (% 98.6)'inde belirlenen AFM_1 miktarının standartlarda belirtilen maksimum limit değeri (0.05 µg/l) aştığını belirtmişlerdir.

Zheng ve ark. (2013) Çin'de 153 adet UHT süt ve 26 adet pastörize süt örneğini ELISA yöntemi ile inceledikleri çalışmada, UHT süt örneklerinin % 54.9'unda 0.006-0.160 µg/l arasında ve pastörize süt örneklerinin ise % 96.2'sinde 0.023-0.154 µg/l arasında AFM_1 tespit edildiğini bildirmişlerdir.

Golge (2014) Adana'da 176 adet çiğ süt örneğini HPLC-FLD yöntemi ile inceledikleri araştırmada, örneklerin 53 (% 30.1)'ünün AFM_1 ile kontamine olduğunu ve 30 (% 17)'unda belirlenen AFM_1 miktarının Türk Gıda Kodeksi (2011)'nde belirtilen maksimum limit değeri (0.05 µg/l) aştığını bildirmişlerdir.

Kocasari (2014) Burdur'da 41 adet UHT süt örneğini ELISA yöntemi kullanarak incelediği çalışmada, örneklerin 30 (% 73.2)'unda 6.42-71.33 ng/l arasında değişen konsantrasyonlarda AFM_1 tespit edildiğini ve 3 (% 7.3)'ünde belirlenen AFM_1 miktarının Türk Gıda Kodeksi (2011)'nde belirtilen maksimum limit değeri (0.05 µg/l) aştığını bildirmiştir.

İşleyici ve ark. (2015) Van'da yaz mevsiminde marketlerde ambalajsız olarak satışa sunulan 100 adet çiğ süt örneğini kompetetif ELISA yöntemiyle inceledikleri araştırmada, örneklerin 12 (% 12)'sinde belirlenen AFM_1 miktarının

Türk Gıda Kodeksi (2011)'nde belirtilen maksimum limit değeri (0.05 µg/l) aştığını bildirmişlerdir.

Koçak ve ark. (2015) Aydın'da 90 adet aromalı UHT süt örneğini (30 Kakaolu, 30 çilekli, 30 muzlu) ELISA yöntemiyle inceledikleri çalışmada, örneklerin 68 (% 75.6)'inin 0.39-26.6 ng/l arasında AFM_1 ile kontamine olduğunu bildirmişler ve hiçbir örnekteki AFM_1 miktarının Türk Gıda Kodeksi (2011)'nde belirtilen maksimum limit değeri (0.05 µg/l) aşmadığını belirtmişlerdir.

Rama ve ark. (2015) Kosova'nın başkenti Piriştina'da 84 adet pastörize süt ve 94 adet UHT süt olmak üzere toplam 178 süt örneğini ELISA yöntemiyle inceledikleri çalışmada, pastörize sütlerin 70 (% 83.3)'inin, UHT sütlerin 74 (% 78.7)'ünün ve toplamda da 144 örneğin (% 80.8) AFM_1 içerdiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, pastörize sütlerin 18 (% 21.4)'inde ve UHT sütlerin 4 (% 4.2)'ünde belirlenen AFM_1 miktarının Commission Regulation (2010)'da belirtilen maksimum limit değeri (0.05 µg/l) aştığını bildirmişlerdir.

Sifuentes dos Santos ve ark. (2015) Brezilya'nın Londrina ve Parana Eyaletleri'nde 42 adet süt ve süt ürünlerini (7 pastörize süt, 28 UHT süt, 7 süt tozu) inceledikleri çalışmada, tüm örneklerde 0.01-0.81 µg/kg arasında ve ortalama 0.13 µg/kg AFM_1 tespit edildiğini, ancak örneklerin hiçbirinde belirlenen AFM_1 miktarının Brezilya'daki standartlara göre maksimum limit değer olan 0.5 µg/kg değerini aşmadığını belirtmişlerdir.

Tomašević ve ark. (2015) Sırbistan'da 678 adet çiğ süt ve 438 adet ısıl işlem görmüş süt örneğini ELISA yöntemiyle inceledikleri çalışmada, çiğ sütlerin 540'ının ve ısıl işlem görmüş sütlerin 317'sinin AFM_1 ile kontamine olduğunu, çiğ sütlerin 382 (% 56.3)'sinde ve ısıl işlem görmüş sütlerin 143 (% 32.6)'ünde belirlenen AFM_1 miktarının Commission Regulation (2010)'da belirtilen maksimum limit değeri (0.05 µg/l) aştığını bildirmişlerdir.

Tajik ve ark. (2016) İran'da 220 adet pastörize süt ve 140 adet UHT süt olmak üzere toplamda 360 adet süt örneğini ELISA yöntemiyle inceledikleri çalışmada, bütün örneklerin 280 (% 77.7)'inin AFM_1 ile kontamine olduğunu, pastörize sütlerin 154 (% 70)'ünde ve UHT sütlerin 76 (% 54.2)'sında belirlenen AFM_1 miktarının Commission Regulation (2010)'da belirtilen maksimum limit değeri (0.05 µg/l) aştığını bildirmişlerdir.

Alatalı (2017) yaptığı bir çalışmada, incelediği 75 adet UHT süt örneğinin 69 (% 92)'unda farklı miktarlarda AFM_1 tespit edildiğini bildirmiştir.

Kızıl ve ark. (2017) Elazığ'da 50 adet çiğ inek sütü ve 50 adet sade UHT sütünde AFM_1 varlığını incelediği araştırmada, sadece bir çiğ süt örneğinde belirlenen AFM_1 miktarının Türk Gıda Kodeksi (2011)'nde belirtilen maksimum limit değeri (0.05 µg/l) aştığını bildirmişlerdir.

Yurt ve Uluçay (2017) Iğdır ve bazı ilçelerinde üretilen 25 adet çiğ süt örneğini HPLC yöntemiyle inceledikleri araştırmada, örneklerin tamamında 0.018-0.460 µg/l arasında ve ortalama 0.132±0.107 µg/l AFM_1 tespit edildiğini, ayrıca 20 örnekte belirlenen AFM_1 miktarının Türk Gıda Kodeksi (2011)'nde belirtilen maksimum limit değeri (0.05 µg/l) aştığını belirtmişlerdir.

Karadal ve ark. (2018) Niğde'de 30'ar adet çiğ inek, koyun ve keçi sütlerini ELISA yöntemiyle inceledikleri çalışmada, koyun ve keçi sütlerinin tamamının, çiğ inek sütlerinin ise 26 (% 87)'sının AFM_1 ile kontamine olduğunu ve sadece çiğ inek sütlerinin 3 (% 10)'ünde belirlenen AFM_1 miktarının maksimum limit değer olan 50 ng/l'yi aştığını bildirmişlerdir.

Abyaneh ve ark. (2019) İran (Tahran)'da kış aylarında 45 adet çiğ, pastörize ve UHT süt örneklerini HPLC yöntemi ile inceledikleri bir çalışmada, örneklerin 36 (% 80)'sında AFM_1 tespit edildiğini, hiçbir örnekte belirlenen AFM_1 miktarının İran'da standartlarda belirtilen maksimum limit değer olan 0.1 µg/kg'ı aşmadığını bildirmişlerdir.

Köse ve ark. (2019) Burdur'da farklı marketlerden rastgele alınan 78 adet UHT süt örneğini ELISA yöntemi ile inceledikleri araştırmada, örneklerin 24 (% 30.77)'ünde 4.30-127.44 ng/l arasında ve ortalama 47.54 ng/l AFM_1 tespit edildiğini, pozitif örneklerin 11'inde belirlenen AFM_1 miktarının Türk Gıda Kodeksi (2011)'nde belirtilen maksimum limit değeri (0.05 µg/l) aştığını belirtmişlerdir.

Sumantri ve ark. (2019) Endonezya'nın Yogyakarta Eyaleti'nde 20 adet taze süt, 16 adet pastörize süt ve 6 adet yeniden birleştirilen süt ürünleri olmak üzere toplamda 42 örneği ELISA yöntemiyle inceledikleri çalışmada, örneklerin % 92.5'inin 24-570 ng/l arasında AFM_1 ile kontamine olduğunu, en yüksek AFM_1 miktarının pastörize süt örneklerinde 244 ng/l ve en düşük ise rekombine süt örneklerinde 131 ng/l olarak tespit edildiğini bildirmişlerdir.

Türkoğlu ve Keyvan (2019) 35'er adet çiğ, pastörize ve UHT sterilize süt olmak üzere toplam 105 süt örneğini ELISA yöntemi ile inceledikleri araştırmada, bir UHT süt örneği hariç olmak üzere 104 örnekte AFM_1 tespit edildiğini, örneklerdeki ortalama AFM_1 miktarının 19.54 ng/l olarak belirlendiğini, çiğ sütlerin 5'inde ve UHT sütlerin 3'ünde belirlenen AFM_1 miktarının Commission Regulation (2010)'da belirtilen maksimum limit değeri (0.05 µg/l) aştığını bildirmişlerdir.

Daou ve ark. (2020) Lübnan'da 11 adet UHT ve pstörize süt örneğini inceledikleri çalışmada, örneklerin 10 (% 90.9)'unun AFM_1 ile kontamine olduğunu ve ve bu örneklerin 6 (% 54.5)'sında belirlenen AFM_1 miktarının standartlarda belirtilen maksimum limit değeri (0.05 µg/l) aştığını bildirmişlerdir.

Xiong ve ark. (2020) Çin'de 133 adet çiğ süt, 410 adet pastörize süt, 93 adet uzatılmış raf ömürlü süt (Extended Shelf Life, ESL) ve 98 adet UHT sütten oluşan

toplam 734 süt örneğini ELISA yöntemi ile inceledikleri çalışmada, örneklerin 590 (% 80.4)'ının AFM_1 ile kontamine olduğunu bildirmişlerdir.

2. Gereç ve Yöntem

2.1. Gereç

2.1.1. Örneklerin toplanması

Bu çalışmada; 2020 yılının Ağustos-Eylül aylarında market ve süpermarketlerde satışa sunulan değişik firmalara ait farklı parti numaralı 75 adet UHT süt ve 54 adet UHT organik süt olmak üzere toplam 129 adet süt örneği incelenmiştir. Orijinal ambalajlarındaki (1000 ml) süt örnekleri uygun koşullar altında laboratuvara getirilerek AFM_1 miktarları belirlenmiştir.

2.1.2. Kullanılan kimyasal maddeler

AFM_1 analizlerinde Aflatoksin M_1 standart çözeltisi (Trilogy, TSL-143-2 Lot: 181213R-043, 2 ml asetonitril içinde 0.5 µg/ml AFM_1, USA), methanol (Carlo Erba, 412722, HPLC saflıkta 2.5 l, Fransa), asetonitril (Carlo Erba, 412372000, HPLC saflıkta 2.5 l, Fransa) ve 0.45 µm milipore filtreden süzülen ultra saf su (Synergy®Water Purification System, Almanya) kullanılmıştır.

2.1.3. HPLC cihazının konfigürasyonu

Konfigürasyonda pompa (Shimadzu, LC-20 AT series, 2 adet, Japonya), degasser ünitesi (Shimadzu, DGU-20A 5, Japonya), oto örnekleyici (Shimadzu, SIL20AC, soğutmalı 4 ºC, Japonya), dedektör (Shimadzu, SPD-M20A, DAD dedektör, Japonya), kolon fırını (Shimadzu, CTO-10AS VP, ısıtmalı, Japonya), sistem kontrol (Shimadzu, CBM-20 ALITE, Japonya), cihaz yazılımı (Shimadzu, LC solution 1.12 SP1'e sahip) ve HPLC cihazı (Shimadzu, Kyoto, Japonya) kullanılmıştır. Enjeksiyon miktarı; 100 µl, akış hızı; 1 ml/dk, kolon tipi; C 18 (Hypersil™ ODS-2 C18 Columns, Sweden), dedektör tipi; FLD, kolon fırını sıcaklığı; 25 ºC, taşıyıcı faz; ultra saf su+asetonitril+metanol (50+30+20, *v/v/v*), dalga boyu; 360-430 nm (süre: 11 dk-9 dk post run, toplam 20 dk)'dir.

2.1.4. Kullanılan araç ve gereçler

İmmünoaffinite kolon (IAK) (R-Biopharm, Easi-Extract® Aflatoxin, İskoçya), HPLC kolonu (Hypersil™ ODS-2 C18 Columns 31605-254630, İsveç), Whatman No: 4 (WHA1004090, Almanya), ultra saf su cihazı (Milipore, 18.2, İsveç), vorteks (Heidolph Reax Top D-91126, ABD), su banyosu (Electro-Mag, M96 KP, Türkiye), santrifüj (Sima® 3-30K, Almanya), falcon tüp 60 ml (Isolab, Türkiye), cam vial (NDI I Vial2 ml, Waters), 60 cc'lik enjektör ve otomatik pipet ve uçları (Eppendorf, Mavi, 100-1000 µl, Almanya) kullanılmıştır.

2.2. Yöntem

Süt örneklerinin AFM_1 analizlerinde AOAC (2005) metodundan yararlanılmıştır. AFM_1'e özgün monoklonal antikorların bağlanmış olduğu bir destek katıyla doldurulmuş olan immuno affinite kolondan örneğin geçirilmesi ve örnek içerisinde bulunan AFM_1 toksininin ekstrakte edilmesi prensibine dayanmaktadır. Örnek, kolondan geçirildiğinde, örnekte bulunan AFM_1 toksini antikorlar tarafından tamamen tutulmakta ve bir antijen-antikor kompleksi meydana gelmektedir. Kolonda tutulan toksin, kolondan geçirilen asetonitril+metanol (30+20, *v/v*) çözeltisi ile yıkanmakta ve elde edilen eluat floresan dedektörlü HPLC cihazına enjekte edilmektedir. Yöntem 4 aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar; HPLC cihazının kalibrasyonu, ekstraksiyon, HPLC enjeksiyon işlemi ve geri kazanım aşamalarıdır.

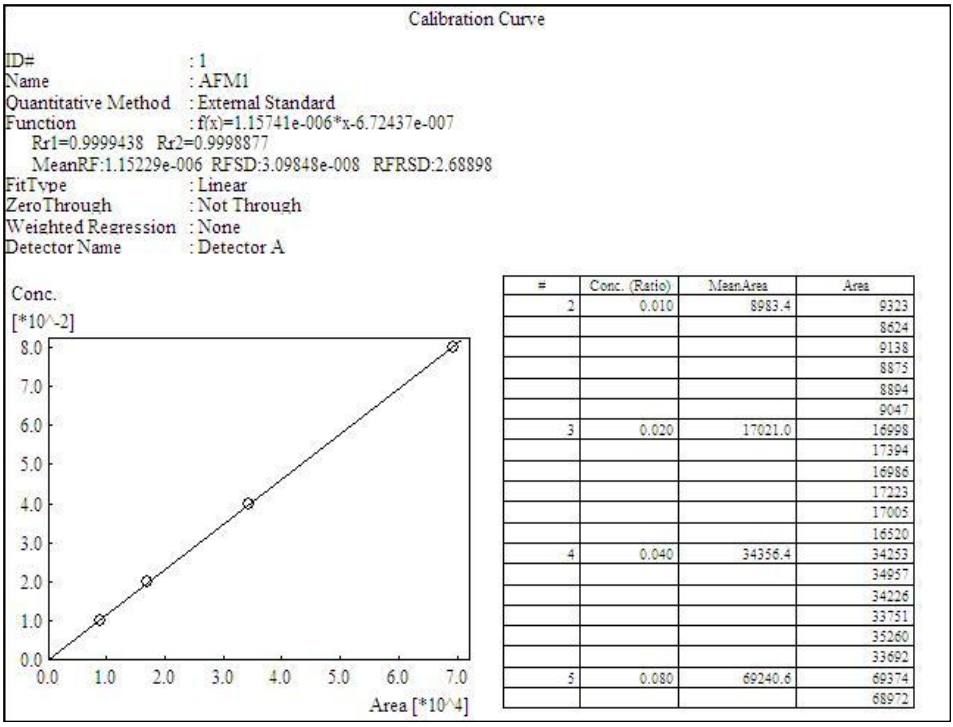
2.2.1. HPLC cihazının kalibrasyonu

AFM_1 ana stoğundan (0.500 µg/ml) 100 µl alınarak mobil faz (ultra saf su+asetonitril+metanol) (50+30+20, *v/v/v*) ile 5000 µl'ye tamamlanarak 0.01 µg/ml konsantrasyonda II. düzey stok hazırlandı.

II. düzey stokdan (0.01 µg/ml) farklı konsantrasyonlarda sulandırmalar yapılarak III. düzey çalışma standardları hazırlanmış ve kalibrasyon tamamlanmıştır (Tablo 3). AFM_1 standardına ait kalibrasyon grafiği Şekil 2'de verilmiştir.

Tablo 3. AFM_1 kalibrasyon standart seviyelerinin hazırlanması.

Vial No	Stok standart çözeltiden alınan miktar (µl)	Mobil fazdan alınan miktar (µl)	AFM_1 konsantrasyonu (µg/ml)	Enjekte edilen AFM_1 miktarı (ng)
1	50	4950	0.10	0.010
2	100	4900	0.20	0.020
3	200	4800	0.40	0.040
4	400	4600	0.80	0.080



#	Conc. (Ratio)	MeanArea	Area
2	0.010	8983.4	9323
			8624
			9138
			8875
			8894
			9047
3	0.020	17021.0	16998
			17394
			16986
			17223
			17005
			16520
4	0.040	34356.4	34253
			34957
			34226
			33751
			35260
			33692
5	0.080	69240.6	69374
			68972

Şekil 2. AFM_1 standardına ait kalibrasyon grafiği.

2.2.2. Ekstraksiyon

Homojenliğin sağlanması için incelenecek süt örnekleri santrifüj edilmeden önce ultrasonik su banyosunda 35-37°C'de ısıtıldı. Yağ tabakasının ayrılması için ultrasonik su banyosundan alınan süt örnekleri 4000 rpm'de 10 dk süreyle santrifüj edildi. Santrifüj edilen süt örnekleri süzgeç kağıdı (Whatman No: 4) yardımıyla süzüldü. Süzülen örneklerden 50 ml alınarak 2-3 ml/dk hızla IAK'dan geçirildi. 20 ml saf su 1-2 damla/sn hızla IAK'dan geçirilerek yıkama yapıldı ve kolon temizlendi. Daha sonra IAK'dan kuru hava geçirilerek kolondaki sıvı tamamen uzaklaştırıldı. 1.25 ml metanol+asetonitril (20+30, *v/v*) çözeltisi 1 damla/sn hızla IAK'dan geçirilerek viale alındı. 1.25 ml ultra saf su 1 damla/sn hızla IAK'dan geçirildi. IAK'dan süzülen ektrakt viale alınarak 1 dk süreyle vortekste karıştırıldı ve HPLC cihazına enjekte edildi.

2.2.3. HPLC enjeksiyon işlemi

Örneklerin HPLC cihazına enjeksiyonundan önce kalibrasyon eğrisi, hazırlanan standart solüsyonu kullanarak kontrol edildi. Standart enjeksiyon sonucu incelendi ve kabul edilebilir sonuçlar olduğu için örneklerin enjeksiyonu yapılmaya başlandı. HPLC cihazına her bir örnekten 1 defa olmak üzere 100 µl enjeksiyon yapıldı. HPLC cihazı konfigürasyonuna ait bilgiler Tablo 4'te özet olarak sunulmuştur.

Tablo 4. HPLC çalışma şartları

HPLC Çalışma Şartları	
Mobil faz	Metonol+Asetonitril+Su (20+30+50, *v/v/v*)
Dedektör	FLD (Eksitasyon: 360 nm, Emisyon: 430 nm)
Kolon sıcaklığı	25°C
Kolon	ODS-2, 5 µ, 250 x 4.6 mm
Pompa akış hızı	1 ml /dk
Basınç	116 ±2 bar
Enjeksiyon volümü	100 µl

HPLC'de okunan değerler sonrasında, örneklerin AFM_1 (µg/kg) miktarları hesaplandı.

$$\textbf{Aflatoksin } M_1 \textbf{ (µg/kg): } \frac{A}{(K \times E) / V}$$

A: HPLC'de okunan kromatogram sonucu

K: Kolondan geçen hacim (50 g)

E: HPLC'ye enjekte edilen hacim (100 µl)

V: Vial içeriği (2500 µl)

Aflatoksin M_1 (µg/kg): A / 2

2.2.4. Geri kazanım

Konsantrasyonu belirli standart, kalibrasyonu yapılmış HPLC cihazına verilerek standardın piki elde edildi. Örnek hazırlanarak aynı programla HPLC'ye verildi. Aynı örneğin içerisine belli miktar (0.02-0.04 µg/kg) standart eklenerek aynı yöntemle örnek hazırlandı ve HPLC'ye verildi. Her pike karşılık gelen alanlar belirlendikten sonra standart eklenmiş örneğin alanından örneğin kendi alanı çıkarıldı. Orijinal standardın alanı belirlenerek bu alanlara karşılık gelen konsantrasyonlar hesaplandı. Buna göre geri kazanım oranı % 88-91 olarak belirlenmiştir.

$$\textbf{Geri kazanım (\%)} = C_{\text{gerçek}} / C_{\text{teorik}} \times 100$$

$C_{\text{gerçek}}$: Örnek içine eklenen standardın geri alma işlemi sonucunda sonrasında hesaplanarak bulunan gerçek konsantrasyon (µg/kg).

C_{teorik}: Örnek içine eklenen standardın teorik olarak bulunması gereken konsantrasyon (µg/kg).

Yöntemin performans kriterlerine ait değerler ile % RSD, LOD ve LOQ değerleri Tablo 5 ve Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 5. AFM_1 için performans kriterleri (Türk Gıda Kodeksi, 2018).

Kriter	Konsantrasyon Aralığı	Tavsiye Edilen Değer
Geri alma	0.01-0.05 (µg/kg)	% 60-120
AFM_1	> 0.05 (µg/kg)	% 70-110

Tablo 6. AFM_1 standart çözeltisine ait HPLC RSD %, LOD ve LOQ değerleri.

Standart	RSD %	LOD	LOQ
AFM_1	2.69	0.001776	0.005383

RSD %: Relative Standard Deviation (Bağıl Standart Sapma); LOD: Limit of Detection (Tayin Limiti); LOQ: Limit of Quantification (Ölçüm Limiti).

2.3. İstatistiksel Analizler

Araştırmada elde edilen verilerin frekans dağılımları ve korelasyon analizleri SPSS 22.0 programında (2013) yapılmıştır.

3. Bulgular

Market ve süpermarketlerde satışa sunulan değişik firmalara ait farklı parti numaralı 75'i UHT süt ve 54'ü UHT organik süt olmak üzere toplam 129 süt örneği AFM_1 varlığı yönünden incelenmiştir. İncelenen 75 adet UHT süt örneğinin tümünde de AFM_1 tespit edilmiş (0.0072-0.0439 µg/kg) olup, ancak hiçbir örnekteki AFM_1 miktarının Türk Gıda Kodeksi (2011)'nde belirtilen maksimum limit değeri (0.05 µg/kg) aşmadığı görülmüştür. Ayrıca incelenen 54 adet UHT organik süt örneğinin 48 (% 88.89)'inde AFM_1 tespit edilmiş (<LOD-0.0478 µg/kg) olup, ancak hiçbir örnekteki AFM_1 miktarının Türk Gıda Kodeksi (2011)'nde belirtilen maksimum limit değeri (0.05 µg/kg) aşmadığı görülmüştür.

Farklı firmalara ait UHT süt örneklerinde (15'er adet) tespit edilen AFM_1 miktarları Tablo 7'de sunulmuştur.

Tablo 7. Farklı firmalara ait UHT süt örneklerinde belirlenen AFM_1 miktarları (μg/kg)

	A	B	C	D	E
Örnek No	**AFM_1**	**AFM_1**	**AFM_1**	**AFM_1**	**AFM_1**
1.	0.0242	0.0117	0.0072	0.0413	0.0182
2.	0.0359	0.0146	0.0090	0.0338	0.0091
3.	0.0185	0.0115	0.0080	0.0256	0.0092
4.	0.0195	0.0144	0.0075	0.0332	0.0245
5.	0.0204	0.0103	0.0081	0.0164	0.0087
6.	0.0206	0.0130	0.0072	0.0109	0.0177
7.	0.0198	0.0115	0.0091	0.0393	0.0282
8.	0.0170	0.0139	0.0092	0.0368	0.0195
9.	0.0326	0.0122	0.0093	0.0314	0.0133
10.	0.0271	0.0107	0.0096	0.0368	0.0312
11.	0.0138	0.0121	0.0102	0.0205	0.0156
12.	0.0169	0.0372	0.0163	0.0312	0.0077
13.	0.0217	0.0131	0.0079	0.0180	0.0163
14.	0.0333	0.0122	0.0086	0.0439	0.0092
15.	0.0187	0.0131	0.0106	0.0107	0.0121
Minimum	0.0138	0.0103	0.0072	0.0107	0.0077
Maksimum	0.0359	0.0372	0.0163	0.0439	0.0312
Ortalama	0.0227	0.0141	0.0092	0.0286	0.0160
Standart Sapma	0.0066	0.0065	0.0022	0.0109	0.0073

Tablo 7 incelendiğinde; AFM_1 miktarının en düşük C grubu süt örneklerinde (0.0072 μg/kg), en yüksek ise D grubu süt örneklerinde (0.0439 μg/kg) olduğu, elde edilen ortalama bulgulara bakıldığında da en düşük ortalamanın yine C grubu sütlerde (0.0092±0.0022 μg/kg), en yüksek ortalamanın ise D grubu sütlerde (0.0286±0.0109 μg/kg) olduğu görülmektedir.

Farklı firmalara ait UHT organik süt örneklerinde (18'er adet) tespit edilen AFM_1 miktarları Tablo 8'de sunulmuştur.

Tablo 8. Farklı firmalara ait UHT organik süt örneklerinde belirlenen AFM_1 miktarları (µg/kg).

	A	B	C
Örnek No	**AFM_1**	**AFM_1**	**AFM_1**
1.	0.0478	<LOD	0.0067
2.	0.0469	<LOD	0.0070
3.	0.0345	0.0032	0.0071
4.	0.0339	0.0031	0.0070
5.	0.0233	0.0070	0.0064
6.	0.0234	0.0069	0.0073
7.	0.0115	0.0024	0.0098
8.	0.0119	0.0023	0.0088
9.	0.0201	0.0050	0.0082
10.	0.0220	0.0048	0.0084
11.	0.0233	<LOD	0.0081
12.	0.0236	<LOD	0.0088
13.	0.0290	<LOD	0.0085
14.	0.0304	<LOD	0.0161
15.	0.0407	0.0037	0.0070
16.	0.0419	0.0035	0.0077
17.	0.0318	0.0088	0.0073
18.	0.0320	0.0085	0.0172
Minimum	0.0115	<LOD	0.0064
Maksimum	0.0478	0.0088	0.0172
Ortalama	0.0293	0.0033	0.0087
Standart Sapma	0.0106	0.0030	0.0030

<LOD: Limit of Detection (Tayin Limiti)

Tablo 8 incelendiğinde; AFM_1 miktarının en düşük B grubu sütlerde tespit değerinin altında, en yüksek ise A grubu sütlerde (0.0478 µg/kg) olduğu, süt örneklerinin AFM_1 ortalamaları incelendiğinde ise en düşük ortalamanın B grubu sütlerde (0.0033±0.0030 µg/kg), en yüksek ortalamanın ise A grubu sütlerde (0.0293±0.0106 µg/kg) olduğu görülmektedir.

UHT süt örneklerinin tümünde belirlenen AFM_1 miktarları Tablo 9'da sunulmuştur.

Tablo 9. UHT süt örneklerinin tümünde belirlenen AFM_1 miktarları (μg/kg).

UHT Süt Örnekleri					
Örnek No	**AFM_1**	**Örnek No**	**AFM_1**	**Örnek No**	**AFM_1**
1.	0.0242	**26.**	0.0121	**51.**	0.0109
2.	0.0359	**27.**	0.0372	**52.**	0.0393
3.	0.0185	**28.**	0.0131	**53.**	0.0368
4.	0.0195	**29.**	0.0122	**54.**	0.0314
5.	0.0204	**30.**	0.0131	**55.**	0.0368
6.	0.0206	**31.**	0.0072	**56.**	0.0205
7.	0.0198	**32.**	0.0090	**57.**	0.0312
8.	0.0170	**33.**	0.0080	**58.**	0.0180
9.	0.0326	**34.**	0.0075	**59.**	0.0439
10.	0.0271	**35.**	0.0081	**60.**	0.0107
11.	0.0138	**36.**	0.0072	**61.**	0.0182
12.	0.0169	**37.**	0.0091	**62.**	0.0091
13.	0.0217	**38.**	0.0092	**63.**	0.0092
14.	0.0333	**39.**	0.0093	**64.**	0.0245
15.	0.0187	**40.**	0.0096	**65.**	0.0087
16.	0.0117	**41.**	0.0102	**66.**	0.0177
17.	0.0146	**42.**	0.0163	**67.**	0.0282
18.	0.0115	**43.**	0.0079	**68.**	0.0195
19.	0.0144	**44.**	0.0086	**69.**	0.0133
20.	0.0103	**45.**	0.0106	**70.**	0.0312
21.	0.0130	**46.**	0.0413	**71.**	0.0156
22.	0.0115	**47.**	0.0338	**72.**	0.0077
23.	0.0139	**48.**	0.0256	**73.**	0.0163
24.	0.0122	**49.**	0.0332	**74.**	0.0092
25.	0.0107	**50.**	0.0164	**75.**	0.0121
Minimum	0.0072				
Maksimum	0.0439				
Ortalama±SS	0.0181±0.0099				

SS: Standart sapma

Tablo 9 incelendiğinde; UHT süt örneklerinde AFM_1 miktarlarının 0.0072-0.0439 arasında ve ortalama 0.0181±0.0099 μg/kg olduğu, incelenen 75 adet UHT süt örneğinin hiçbirinde AFM_1 miktarının Türk Gıda Kodeksi (2011)'nde belirtilen maksimum limit değeri (0.05 μg/kg) aşmadığı görülmektedir.

UHT organik süt örneklerinin tümünde belirlenen AFM_1 miktarları Tablo 10'da sunulmuştur.

Tablo 10. UHT organik süt örneklerinin tümünde belirlenen AFM_1 miktarları (µg/kg).

UHT Organik Süt Örnekleri			
Örnek No	**AFM_1**	**Örnek No**	**AFM_1**
1.	0.0478	**28.**	0.0048
2.	0.0469	**29.**	<LOD
3.	0.0345	**30.**	<LOD
4.	0.0339	**31.**	<LOD
5.	0.0233	**32.**	<LOD
6.	0.0234	**33.**	0.0037
7.	0.0115	**34.**	0.0035
8.	0.0119	**35.**	0.0088
9.	0.0201	**36.**	0.0085
10.	0.0220	**37.**	0.0067
11.	0.0233	**38.**	0.0070
12.	0.0236	**39.**	0.0071
13.	0.0290	**40.**	0.0070
14.	0.0304	**41.**	0.0064
15.	0.0407	**42.**	0.0073
16.	0.0419	**43.**	0.0098
17.	0.0318	**44.**	0.0088
18.	0.0320	**45.**	0.0082
19.	<LOD	**46.**	0.0084
20.	<LOD	**47.**	0.0081
21.	0.0032	**48.**	0.0088
22.	0.0031	**49.**	0.0085
23.	0.0070	**50.**	0.0161
24.	0.0069	**51.**	0.0070
25.	0.0024	**52.**	0.0077
26.	0.0023	**53.**	0.0073
27.	0.0050	**54.**	0.0172
Minimum	<LOD		
Maksimum	0.0478		
Ortalama±SS	0.0138±0.0130		

<LOD: Limit of Detection (Tayin Limiti), SS: Standart sapma.

Tablo 10 incelendiğinde; UHT organik süt örneklerinde belirlenen AFM_1 miktarlarının <LOD-0.0478 arasında ve ortalama 0.0138±0.0130 µg/kg olduğu, incelenen 54 adet UHT organik süt örneğinin hiçbirinde AFM_1 miktarının Türk

Gıda Kodeksi (2011)'nde belirtilen maksimum limit değeri (0.05 µg/kg) aşmadığı görülmektedir.

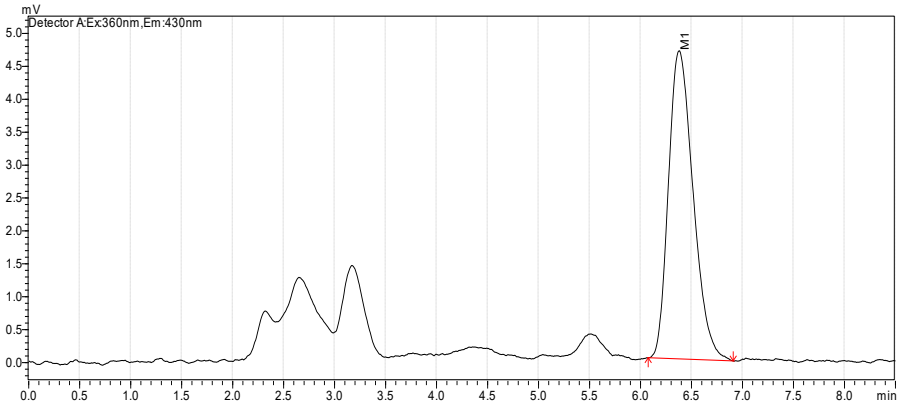
UHT süt ve UHT organik süt örneklerinin AFM_1 yönünden genel değerlendirilmesi Tablo 11'de sunulmuştur.

Tablo 11. UHT süt ve UHT organik süt örneklerinin AFM_1 yönünden genel değerlendirilmesi.

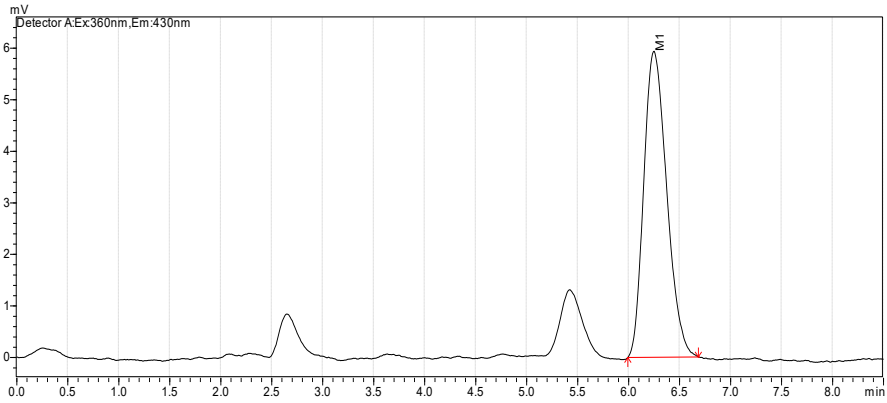
Örnek Türü	Örnek Sayısı	Pozitif Örnek Sayısı	Maksimum Limit Değeri (0.05 µg/kg) Aşan Örnek Sayısı (TGK)
UHT süt	75	75 (% 100)	0
UHT organik süt	54	48 (% 88.89)	0
Toplam	129	123 (% 95.35)	0

Tablo 11 incelendiğinde; UHT süt örneklerinin tamamının (% 100), UHT organik süt örneklerinin ise 48 (% 88.89)'inin AFM_1 yönünden pozitif olduğu, ancak hiçbir örneğin Türk Gıda Kodeksi (2011)'nde belirtilen maksimum limit değeri (0.05 µg/kg) aşmadığı görülmektedir.

HPLC cihazına enjekte edilen AFM_1 standardına ait kromatografi görüntüsü Şekil 3'de ve süt örneğine ait kromatografi görüntüsü ise Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 3. AFM_1 standardına ait kromatografi.



Şekil 4. Süt örneğine ait AFM_1 kromatografisi.

UHT süt örneklerinde gruplar arası korelasyonlar Tablo 12'de gösterilmiş olup, B ve C firmalarına ait süt örnekleri arasında $p<0.01$ düzeyinde pozitif yönlü korelasyon olduğu tespit edilmiştir.

Farklı firmalara ait UHT organik süt örnekleri arasında ise korelasyon bulunmadığı belirlenmiştir.

Tablo 12. Farklı firmalara ait UHT süt örneklerinin AFM_1 miktarları arasındaki korelasyonlar (**: $p<0.01$).

	UHT Süt Örnek Grupları				
	A	**B**	**C**	**D**	**E**
A	1				
B	-,219	1			
C	-,224	,866**	1		
D	,432	,060	,031	1	
E	-,137	-,322	-,267	,294	1

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada 2020 yılının Ağustos-Eylül aylarında market ve süpermarketlerde satışa sunulan UHT sütlerde ve UHT organik sütlerdeki AFM_1 varlığının belirlenmesi amacıyla, değişik firmalara ait farklı parti numaralı 75 adet UHT süt ve 54 adet UHT organik süt olmak üzere toplam 129 süt örneği High Performance Liquide Chromatography (HPLC) yöntemiyle incelenmiştir.

AFB_1 ile kontamine rasyonların alınmasından itibaren 12-24 saat içinde sütte AFM_1 belirlenebilmekte ve kontamine rasyonların alımının kesilmesinden itibaren 72 saat içinde de sütlerdeki AFM_1 düzeyi tespit limitinin altına düşmektedir. AFB_1 ile kontamine olmuş yemlerle beslenen hayvanlardan elde edilen sütlerde; yemlerdeki AFB_1 yoğunluğu aynı olmasına rağmen, metabolik farklılıklardan dolayı sütlerdeki AFM_1 kontaminasyon düzeyi farklı olabilmektedir. Bunun yanında, süt ve süt ürünlerinde tespit edilen AFM_1 düzeyi süt miktarına, laktasyon periyoduna, genetik, çevresel ve mevsimsel faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Özellikle ilkbahar ve yaz aylarında, ekstansif yetiştiricilik yapan işletmelerde hayvanların merada beslenmesine bağlı olarak rasyondaki kesif yem miktarı azalmakta, buna bağlı olarak sütlerdeki AFM_1 yoğunluğu da düşmektedir (Kaya, 2014). Avrupa Birliği (Commission Regulation, 2010)'nde ve Türkiye (Türk Gıda Kodeksi, 2011)'de süt ve süt ürünlerinde bulunabilecek AFM_1 miktarları için maksimum limit değerler belirtilmiştir.

İncelenen UHT süt örneklerinde B ve C firmalarına ait sütler arasında istatistiksel olarak pozitif yönlü bir ilişki ($p<0.01$) olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, firmaların üretimde kullandıkları hammadeleri farklı yörelerdeki değişik çiftliklerden temin etmesinden kaynaklanmış olabilir.

Farklı firmalara ait UHT organik süt örnekleri arasında istatistiksel olarak önemli bir ilişki olmaması ise, organik süt üretimi yapan firmaların sayısının fazla olmaması ile incelenen örneklerde belirlenen AFM_1 miktarlarının birbirine çok yakın ve düşük olması ile ilişkilendirilebilir.

Bu çalışmada incelenen UHT süt örneklerindeki AFM_1 miktarları 0.0072-0.0439 µg/kg arasında ve ortalama 0.0181±0.0099 µg/kg (Tablo 9), UHT organik süt örneklerinde ise <LOD-0.0478 µg/kg arasında ve ortalama 0.0138±0.0130 µg/kg olarak belirlenmiştir (Tablo 10). İncelenen örneklerin hiçbirinin yasal mevzuatlarda belirtilen maksimum limit değerini (0.05 µg/kg) aşmadığı tespit edilmiştir (Tablo 11).

UHT süt ve UHT organik süt örneklerinde AFM_1 miktarlarının düşük ve yasal mevzuatlarda (Commission Regulation, 2010; Türk Gıda Kodeksi, 2011) belirtilen maksimum limit değerin (0.05 µg/kg) altında olması, analizlerin yaz aylarının sonuna doğru yapılmasına bağlı olarak incelenen süt örneklerinin muhtemelen yaz sütlerinden üretimiş olmasından kaynaklanmış olabileceği

düşünülmektedir. Nitekim, süt ve süt ürünlerindeki AFM_1 miktarının hayvanların yaz aylarında meralarda genellikle taze yeşil yemlerle beslenmelerine bağlı olarak daha az olduğunu belirten Galvano ve ark. (1996), Bakırcı (2001), Coşkun ve Şanlı (2016) ile Madalı ve Ayaz (2017)'ın görüşleri bu düşünceyi destelemektedir.

Yapılan bu çalışma sonuçlarından farklı olarak UHT sütlerde AFM_1 kontaminasyon düzeyinin tespit edilmesine yönelik yapılan araştırmaların bazılarında (Martins ve Martins, 2000; Unusan, 2006; Kamkar, 2008; Tekinşen ve Eken, 2008; Gündinç ve Filazi, 2009; Heshmati ve Milani, 2010; Atasever ve ark., 2010; Delialioğlu ve ark., 2010; Fallah, 2010; İşleyici ve ark., 2012; Kabak ve Ozbey, 2012; Saraç, 2012; Siddappa ve ark., 2012; Zheng ve ark., 2013; Kocasari, 2014; Rama ve ark., 2015; Tajik ve ark., 2016; Alatalı, 2017; Köse ve ark., 2019; Türkoğlu ve Keyvan, 2019; Daou ve ark., 2020; Xiong ve ark., 2020) AFM_1 miktarı Commission Regulation (2010) ve Türk Gıda Kodeksi (2011)'nde belirtilen maksimum limit değerin üzerinde bulunmuş, bazı araştırmalarda (Santini ve ark., 2013; Kızıl ve ark., 2017; Alahlah ve ark., 2020) ise bu çalışma sonuçlarına benzer olarak maksimum limit değerin altında olduğu bildirilmiştir.

Hatalı tarımsal üretim prosesleri, hayvan beslemede kullanılan rasyonlarda küflerin üremesine ve toksin oluşumuna neden olmaktadır. Bu tür rasyonların hayvanlar tarafından tüketilmesi neticesinde var olan AFB_1 düzeyine bağlı olarak sütlerde değişen oranlarda AFM_1 kontaminasyonu görülmektedir. AFM_1 ile kontamine süt ve süt ürünlerinin halk sağlığı açısından ciddi bir risk oluşturduğu bazı araştırmacılar tarafından belirtilmektedir (Martins ve Martins, 2000; Unusan, 2006; Heshmati ve Milani, 2010; İşleyici ve ark., 2012; Iqbal ve ark., 2015; Tajik ve ark., 2016; Türkoğlu ve Keyvan, 2019; Daou ve ark., 2020).

Bu çalışmada UHT süt örneklerinde AFM_1 miktarları 0.0072-0.0439 µg/kg arasında belirlenmiş ve incelenen örneklerin ortalama AFM_1 miktarı da 0.0181±0.0099 µg/kg (Tablo 9) olarak tespit edilmiştir. UHT süt örneklerinde belirlenen ortalama AFM_1 miktarı (0.0181±0.0099 µg/kg), Fallah (2010) (46.4 ng/l) ile Köse ve ark. (2019)'nın (47.54 ng/l) UHT sütlerde, İşleyici ve ark. (2012)'nın da tam yağlı (42.78 ng/l) ve yarım yağlı (38.73 ng/l) UHT sütlerde bildirdikleri ortalama AFM_1 miktarlarından daha düşüktür.

Çiğ sütlerde Lee ve ark. (2009)'nın 0.026 µg/l ve Yurt ve Uluçay (2017)'ın 0.132 µg/l olarak bildirdikleri ortalama AFM_1 miktarları, bu çalışmada incelenen UHT süt örneklerinde belirlenen ortalama AFM_1 miktarından daha yüksektir.

Hayvan yemlerinde aflatoksin oluşmasında yem maddelerinin hasadı, depolanması, nakliyesi ve hayvanlara verilmesi aşamalarında aflatoksin üretebilen küflerle kontamine olması oldukça önemlidir. Sütlerde AFM_1 varlığının belirlenmesi, hayvan yemlerinin hasadı ve işlenerek muhafaza edilmesi aşamalarında hijyenik kurallara tam olarak uyulmadığını göstermektedir.

Hayvan beslemede kullanılan tarımsal ürünlerde küf kontaminasyonu ve mikotoksin sentezinde; tüm üretim ve muhafaza prosesleri boyunca fiziksel, kimyasal ve biyolojik faktörler etkili olabilmektedir (Kaya, 2014). Aflatoksinler çeşitli gıdalar ve yemlerde uygun şartlarda oluşabilmektedir. Aflatoksin oluşumunda ortamın nisbi nemi ve sıcaklığı ile ürünlerdeki rutubet miktarı önemlidir (Tunail, 2000; Kaya, 2014).

Aflatoksinler, ısıya karşı dirençleri yüksek olup erime noktasına kadar olan sıcaklık derecelerine dayanıklıdırlar. Tamamen parçalanabilmeleri için 300 °C ısıya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple UHT, sterilizasyon ve pastörizasyon gibi süte uygulanan ısıl işlem tekniklerinde kullanılan ısı derecelerinin, aflatoksinlerin yıkımlanması üzerinde yeterli şekilde etkileri bulunmamaktadır (WHO, 1993). Aflatoksinlerin, halk sağlığı üzerinde ve en önemlisi bebekler ve çocuklar üzerinde çok ciddi toksik etkileri bulunmaktadır. AFM_1 ile kontamine sütlerin süt ürünlerine işlenmesiyle birlikte bu ürünlerde farklı düzeylerde AFM_1 kontaminasyonu görülmektedir. Bundan dolayı ilgili resmi kurumlar tarafından düzenli olarak bu ürünlerde aflatoksin kontrollerinin yapılması halk sağlığı açısından oldukça önemlidir. Süt ve süt ürünlerinde ilgili kurumlarca aflatoksin kontrollerinin düzenli aralıklarla yapılması ve denetlenmesi gerektiği bazı araştırmacılar (Akdemir ve Altıntaş, 2004; Gurban ve ark., 2017; Abdali ve ark., 2020) tarafından da belirtilmektedir.

Çiğ sütte stabil olan AFM_1; süt ürünlerinde (pastörize süt, peynir, yoğurt, krema, terayağı) değişik oranlarda kararlılığını sürdürmekte, hatta peynirlerdeki yoğunluğu kazeinden dolayı süttekine göre 3-4 kat fazla olabilmektedir (Yaygın ve Demiryol, 1980). Aflatoksinlerin ısıya karşı dirençleri yüksek olduğundan, pastörizasyon ve sterilizasyon derecelerinin de aflatoksinlerin inaktivasyonunda yeterli olmadığından süt, peynir, yoğurt ve dondurma gibi süt ürünlerinde de (Tekinşen ve Eken, 2008; Atasever ve ark., 2011; Dinçel ve ark., 2012; Abdali ve ark., 2020; Daou ve ark., 2020) AFM_1 farklı miktarlarda tespit edilmiştir.

Daha önce değişik bölgelerde yapılan çalışmalar ile bu çalışmanın bulguları arasındaki farklılıklar; örneklerin alındığı coğrafi bölgelerin farklı olmasına, mevsimsel farklılıklara, laktasyon periyoduna ve uygulanan analiz yöntemlerine bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Yine hayvanlara verilen yemlerdeki AFB_1 kontaminasyonları da bu farklılıkların oluşmasında etkili olabilmektedir.

Sütlerdeki AFM_1 varlığının, hayvanların beslenmesinde kullanılan yemlerde bulunan AFB_1'den kaynaklandığı ve rasyonların AFB_1 yönünden kontaminasyon oranlarına bağlı olarak AFM_1 yoğunluğunun arttığı ve AFB_1 düzeyinin azalmasıyla da AFM_1 yoğunluğunun düştüğü ifade edilmektedir (Özkazanç ve ark., 1992). Hayvanların beslenmesinde kullanılan yemlerde muhtemel olarak bulunabilen AFB_1'in karaciğerde metabolize olarak AFM_1'e dönüşmesi de, bu çalışmada incelenen örneklerde farklı miktarlarda AFM_1 tespit edilmesindeki önemli etkenler arasında yer almaktadır.

Kamkar (2008), Gündiç ve Filazi (2009) ile Saraç (2012)'ın inceledikleri örneklerin tamamında AFM_1 belirlemeleri bu araştırmada da incelenen UHT sütlerin tamamında (% 100) AFM_1 belirlenmesi ile benzer bulunurken, ilgili araştırmalarda sırasıyla % 79.92, % 20.00 ve % 9.1'inin maksimum limit değerin üstünde AFM_1 tespit edilen süt örneklerinin olması bakımından farklılık göstermektedir.

Commission Regulation (2010) ve Türk Gıda Kodeksi (2011)'nde çiğ süt ve ısıl işlem görmüş sütlerde AFM_1 miktarları için maksimum limit değer 0.05 µg/kg olarak belirtilmiştir. İncelenen tüm UHT süt örneklerindeki AFM_1 miktarları yasal mevzuatlarda belirtilen maksimum limit değerin (0.05 µg/kg) altındadır (Tablo 11).

Bu çalışmada incelenen UHT organik süt örneklerinin 6 (% 11.11)'sında AFM_1 miktarı tespit limit değerinin altında (<LOD) ve ortalama 0.0138±0.0130 µg/kg olarak belirlenmiştir (Tablo 10).

Armorini ve ark. (2016) İtalya'da (Bologna) yaptıkları araştırmada 22 organik süt örneğinin 11'inde AFM_1 pozitif olduğunu, AFM_1 miktarının 9-26 ng/l arasında ve ortalama 17 ng/l olarak belirlendiğini bildirmişlerdir. Pozitif örneklerin hiçbirinin maksimum limit değeri aşmadığı ve bu sonucun alınmasında ürünlerin piyasaya sürülmeden önce yapılan kontrollerin etkinliğini gösterdiği ifade edilmiştir.

Ghidini ve ark. (2005) İtalya'da yapmış oldukları bir çalışmada, 78 organik süt örneğinin 76 (% 97.4)'sında AFM_1 belirlendiğini ve 38 örneğin (% 48.7) Commission Regulation (2010)'da belirtilen maksimum limit değeri aştığını belirtmişlerdir.

Bu çalışmada UHT organik süt örneklerinde tespit edilen AFM_1 bulunma oranı (% 88.89) Armorini ve ark. (2016)'nın bildirdikleri orandan (% 50) daha yüksek, Ghidini ve ark. (2005)'nın bildirdikleri orandan (% 97.4) daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca bu çalışmada belirlenen ortalama AFM_1 miktarı (0.0138±0.0130 µg/kg) yönünden ise, Ghidini ve ark. (2005)'nın 35 ng/l olarak bildirdikleri miktar ile Armorini ve ark. (2016)'nın 17 ng/l olarak bildirdikleri miktardan daha düşüktür.

Bu çalışmada incelenen tüm UHT organik süt örneklerindeki AFM_1 miktarları Commission Regulation (2010) ve Türk Gıda Kodeksi (2011)'nde çiğ süt ve ısıl işlem görmüş sütlerde AFM_1 miktarları için belirtilen maksimum limit değerin (0.05 µg/kg) altında tespit edilmiştir.

UHT organik sütlerde AFM_1 kontaminasyon düzeyinin tespit edilmesine yönelik yapılan bir araştırmada (Ghidini ve ark., 2005) AFM_1 miktarının Commission Regulation (2010)'da belirtilen maksimum limit değerin üzerinde, başka bir araştırmada (Armorini ve ark., 2016) ise maksimum limit değerin altında olduğu bildirilmiştir. Bu çalışmada incelenen örneklerin tamamının

standartlarda belirtilen maksimum limit değere uygun olması, Armorini ve ark. (2016)'nın bildirdikleri sonuçlarla benzerlik göstermektedir.

Yaygın bir şekilde tüketilen sütlerin AFM_1 yönünden sürekli olarak kontrol edilmesi aflatoksikozis vakalarının önlenerek halk sağlığının korunması açısından önemlidir. Bilinçsiz bir şekilde yapılan tarım uygulamaları ile yemlerin üretim ve depolanma aşamalarındaki uygunsuz koşullar; küflerin üremesine, toksinlerin oluşmasına ve bu yem maddelerini tüketen hayvanların sütlerinde de yüksek miktarlarda AFM_1 bulunmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada incelenen örneklerin hiçbirinin standartlarda belirtilen maksimum limit değeri (0.05 µg/kg) aşmamasına rağmen, örneklerin çoğunda farklı miktarlarda AFM_1 tespit edilmiş olması halk sağlığı açısından risk oluşturabilir. Sütlerde tespit edilen AFM_1'in halk sağlığı açısından ciddi riskler oluşturduğu Kantemir (2007), Fallah (2010), İşleyici ve ark. (2012), Suliman ve Abdalla (2013), Rama ve ark. (2015), Sumantri ve ark. (2019) ile Daou ve ark. (2020) tarafından yapılan araştırmalarla da ortaya konulmuştur.

Aflatoksinlerin gıdalardaki miktarları ile ilgili maksimum limit değerlerde gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler arasında önemli farklılıklar olduğu gözlenmektedir. Günümüzde birçok ülke insanlar ve hayvanların sağlığını korumak için gıdalar ve yemlerdeki aflatoksinler ile ilgili sürekli yasal düzenlemeler yaparak birtakım önlemler almaya çalışmaktadırlar. İlgili ürünlerdeki aflatoksin miktarları için tolere edilebilen maksimum limit değerleri ve gıda güvenliğini sağlamaya yönelik alınabilecek önlemleri belirleyen mevzuatların geliştirilerek yenilenmesi halk sağlığının korunması açısından önemli uygulamalar olarak değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak; bu çalışmada UHT süt ve UHT organik süt örneklerindeki AFM_1 miktarlarının Commission Regulation (2010) ve Türk Gıda Kodeksi (2011)'nde sütlerde belirtilen maksimum limit değerlere uygun olduğu tespit edilmiştir. Ancak, incelenen örneklerin çoğunda farklı miltarlarda AFM_1 tespit edilmiş olması, hayvanların beslenmesinde aflatoksinlerle kontamine olmuş yemlerin kullanılmış olabileceğini düşündürmekte ve bu tür sütlerin tüketiminin halk sağlığı açısından risk oluşturabileceği değerlendirilmektedir. Bundan dolayı çiftlikten sofraya kadar geçen tüm süreçlerde kritik kontrol noktalarındaki koruyucu önlemler titizlikle uygulanmalıdır. Aflatoksinlerin halk sağlığı açısından özellikle de bebekler ve çocuklarda ciddi toksik etkilerinin bulunduğu ve bu toksinlerin sterilizasyon ve pastörizasyon gibi ısıl işlemlere dayanıklı oldukları göz ardı edilmeden sık aralıklarla ve düzenli olarak denetimler yapılmalıdır.

Yemlerde bulunabilen AFB_1 ve AFB_2'nin sütlere geçerek AFM_1 ve AFM_2'ye dönüşmesinden dolayı sektördeki üreticilerin aflatoksinlerin neden olduğu potansiyel sağlık problemleri ve sonuçları hakkında bilgilendirilebilmeleri için eğitim programlarına ağırlık verilmelidir. Ayrıca süt ve süt ürünlerindeki AFM_1

kontaminasyonunun en aza indirebilmesi için iyi tarım uygulamalarının hayata geçirilmesi, modern üretim tekniklerinin yaygınlaştırılması, süt hayvanlarının beslenmesinde kullanılan yem maddelerinin depolanma şartlarının iyileştirilerek yemlerin AFB_1 yönünden belirli periyotlarda kontrollerinin yapılması ve üreticiler ile birlikte tüketicilerin de bilinç düzeylerinin arttırılmasına yönelik faaliyetlerin düzenlenmesi halk sağlığının korunması açısından üzerinde hassasiyetle durulması gereken konulardır.

Süt ve süt ürünlerinde AFM_1 kontaminasyonunu minimalize etmek için hayvan beslemede kullanılan yemlerdeki AFB_1 varlığı ve yoğunluğunun yetkili otoriteler tarafından denetimlerinin sıklaştırılması faydalı olacaktır. Üreticilerinin aflatoksin kaynaklı potansiyel sağlık problemleri ve sonuçları hakkında bilgilendirilmeleri ve alınacak önlemler konusunda eğitim programlarının yaygınlaştırılması sağlanmalıdır. Yetiştiriciler tarafından süt hayvanlarının beslenmesinde kullanılan yem maddelerinin üretim ve muhafaza şartlarının iyileştirilmesine yönelik desteklerin arttırılması, modern üretim teknikleri, İyi Tarım Uygulamaları (Good Agricultural Practices, GAP), İyi Hijyen Uygulamaları (Good Hygiene Practices, GHP) ve İyi Üretim Uygulamaları (Good Manufacturing Practices, GMP)'nın yaygınlaştırılması ile üretici ve tüketici bilincinin arttırılmasına yönelik eğitici faaliyetlere ağırlık verilmesi halk sağlığının korumasına yönelik olumlu katkılar sağlayacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu kitap bölümü, Veteriner Hekim Nusret Deniz OKAY tarafından Prof. Dr. Yakup Can SANCAK danışmanlığında, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Besin Hijyeni ve Teknolojisi Anabilim Dalında 2021 yılında tamamlanan "UHT Sütlerde ve UHT Organik Sütlerde Aflatoksin M_1 Varlığının Araştırılması" başlıklı yüksek lisans tezinden hazırlanmıştır. Söz konusu araştırma, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Başkanlığı tarafından TYL-2020-8816 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. Araştırmaya sağladığı maddi destekten dolayı Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Başkanlığına teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Abdali, F., Zare, M., Abbasi, A., & Berizi, E. (2020). Aflatoxin M1 occurrence in local dairy products in Shiraz, Southern Iran. International Journal of Nutrition Sciences, 5(3), 146–151.

Abyaneh, H. K., Bahonar, A., Noori, N., Yazdanpanah, H., & AliAbadi, M. H. S. (2019). Exposure to aflatoxin M1 through milk consumption in Tehran population, Iran. Iranian Journal of Pharmaceutical Research, 18(3), 1332–1340.

Akdemir, Ç., & Altıntaş, A. (2004). Ankara'da işlenen sütlerde aflatoksin-M1 varlığının ve düzeylerinin HPLC ile araştırılması. Ankara Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi, 51, 175–179.

Alahlah, N., El Maadoudi, M., Bouchriti, N., Triqui, R., & Bougtaib, H. (2020). Aflatoxin M1 in UHT and powder milk marketed in the northern area of Morocco. Food Control, 114, 107262.

Alatalı, C. (2017). Pastörize günlük süt ve UHT süt örneklerinde aflatoksin M1 varlığı ve düzeyinin araştırılması (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). İstanbul Üniversitesi, İstanbul.

AOAC. (2005). International natural toxins: Aflatoxins (Official Method 2003.02). Official Methods of Analysis of AOAC International içinde. Gaithersburg, MD: AOAC International.

Armorini, S., Altafini, A., Zaghini, A., & Roncada, P. (2016). Occurrence of aflatoxin M1 in conventional and organic milk offered for sale in Italy. Mycotoxin Research, 32(4), 237–246.

Atasever, M., Adıgüzel, G., Atasever, M., Özlü, H., & Özturan, K. (2010). Occurrence of aflatoxin M1 in UHT milk in Erzurum-Turkey. Kafkas Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi, 16, 119–122.

Atasever, M. A., Atasever, M., & Özturan, K. (2011). Aflatoxin M1 levels in retail yoghurt and ayran in Erzurum in Turkey. Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences, 35(1), 59–62.

Bakırcı, İ. (2001). A study on the occurrence of aflatoxin M1 in milk and milk products produced in Van province of Turkey. Food Control, 12(1), 47–51.

Becker-Algeri, T. A., Castagnaro, D., de Bortoli, K., de Souza, C., Drunkler, D. A., & Badiale-Furlong, E. (2016). Mycotoxins in bovine milk and dairy products: A review. Journal of Food Science, 81(3), R544–R552.

Bennett, J. W. (2010). An overview of the genus Aspergillus: Molecular biology and genomics. M. Machida & K. Gomi (Eds.), Aspergillus: Molecular biology and genomics içinde (s. 1–17). Norfolk: Caister Academic Press.

Betina, V. (1989). Mycotoxins: Chemical, biological and environmental aspects. Amsterdam: Elsevier.

Busby, W. F., Jr., & Wogan, G. N. (1984). Aflatoxins. C. E. Searle (Ed.), Chemical carcinogens içinde (2. baskı, s. 945–1136). Washington, DC: American Chemical Society.

Commission Regulation (EU) No 165/2010 of 26 February 2010 amending Regulation (EC) No 1881/2006 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs as regards aflatoxins. (2010). Official Journal of the European Union, L 50, 8–12.

Coppock, R. W., & Christian, R. G. (2007). Aflatoxins. R. C. Gupta (Ed.), Veterinary toxicology: Basic and clinical principles içinde (s. 939–950). New York, NY: Academic Press.

Coşkun, T., & Şanlı, T. (2016). Süt ve süt ürünlerinde kalıntılar. Akademik Gıda, 14(1), 67–74.

Creppy, E. E. (2002). Update of survey, regulation and toxic effects of mycotoxins in Europe. Toxicology Letters, 127(1-3), 19–28.

Çeçen, A. (2009). Ahırda ve merada beslenen hayvanların sütlerinde aflatoksin M1 oluşumunun karşılaştırılması (Yüksek lisans tezi). Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van.

Çelik, T. H., Sarımehmetoğlu, B., & Küplülü, Ö. (2005). Aflatoxin M1 contamination in pasteurised milk. Veterinarski Arhiv, 75(1), 57–65.

Daou, R., Afif, C., Joubrane, K., Khabbaz, L. R., Maroun, R., Ismail, A., & El Khoury, A. (2020). Occurrence of aflatoxin M1 in raw, pasteurized, UHT cows milk, and dairy products in Lebanon. Food Control, 111, 107055.

Delialioğlu, N., Otağ, F., Öcal, N. D., Aslan, G., & Emekdaş, G. (2010). Investigation of aflatoxin M1 levels in raw and market milks in Mersin Province, Turkey. Mikrobiyoloji Bülteni, 44(1), 87–91.

Dinçel, A., Demli, F., Özkaya, F. D., Alatan, F., Uzun, R., & Subaşı, S. A. (2012). Çeşitli peynir örneklerinde aflatoksin M1 varlığının HPLC ile analizi. Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi, 69(2), 89–96.

Duarte, S. C., Almeida, A. M., Teixeira, A. S., Pereira, A. L., Falcão, A. C., Pena, A., & Lino, C. M. (2013). Aflatoxin M1 in marketed milk in Portugal: Assessment of human and animal exposure. Food Control, 30(2), 411–417.

El Marnissi, B., Belkhou, R., Morgavi, D. P., Bennani, L., & Boudra, H. (2012). Occurrence of aflatoxin M1 in raw milk collected from traditional dairies in Morocco. Food and Chemical Toxicology, 50(8), 2819–2821.

Ergin, F., & Küçükçetin, A. (2018). UHT içme sütlerinde jelleşme sorunu: Enzimlerin etkisi. Akademik Gıda, 16(3), 313–322.

Fallah, A. A. (2010). Assessment of aflatoxin M1 contamination in pasteurized and UHT milk marketed in central part of Iran. *Food and Chemical Toxicology*, 48(3), 988–991.

Flores-Flores, M. E., Lizarraga, E., de Cerain, A. L., & González-Peñas, E. (2015). Presence of mycotoxins in animal milk: A review. Food Control, 53, 163–176.

Frisvad, J. C., Skouboe, P., & Samson, R. A. (2005). Taxonomic comparison of three different groups of aflatoxin producers and a new efficient producer of aflatoxin B1, sterigmatocystin and 3-O-methylsterigmatocystin, Aspergillus rambellii sp. nov. Systematic and Applied Microbiology, 28(5), 442–453.

Galvano, F., Galofaro, V., & Galvano, G. (1996). Occurrence and stability of aflatoxin M1 in milk and milk products: A worldwide review. Journal of Food Protection, 59(10), 1079–1090.

Ghidini, S., Zanardi, E., Battaglia, A., Varisco, G., Ferretti, E., Campanini, G., & Chizzolini, R. (2005). Comparison of contaminant and residue levels in organic and conventional milk and meat products from Northern Italy. Food Additives and Contaminants, 22(1), 9–14.

Golge, O. (2014). A survey on the occurrence of aflatoxin M1 in raw milk produced in Adana province of Turkey. Food Control, 45, 150–155.

Gurban, A. M., Epure, P., Oancea, F., & Doni, M. (2017). Achievements and prospects in electrochemical-based biosensing platforms for aflatoxin M1 detection in milk and dairy products. Sensors, 17(12), 2951.

Gündinç, U., & Filazi, A. (2009). Detection of aflatoxin M1 concentrations in UHT milk consumed in Turkey markets by ELISA. Pakistan Journal of Biological Sciences, 12(8), 653–656.

Gürbay, A., Aydın, S., Girgin, G., Engin, A. B., & Şahin, G. (2006). Assessment of aflatoxin M1 levels in milk in Ankara, Turkey. Food Control, 17(1), 1–4.

Heshmati, A., & Milani, M. J. (2010). Contamination of UHT milk by aflatoxin M1 in Iran. Food Control, 21(1), 19–22.

International Agency for Research on Cancer (IARC). (2002). Some traditional herbal medicines, some mycotoxins, naphthalene and styrene (IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Cilt 82). Lyon: IARC Press.

Iqbal, S. Z., Jinap, S., Pirouz, A. A., & Faizal, A. A. (2015). Aflatoxin M1 in milk and dairy products, occurrence and recent challenges: A review. Trends in Food Science & Technology, 46(1), 110–119.

İşleyici, Ö., Sancak, Y. C., & Morul, F. (2011). Divle tulum peynirinde aflatoksin M1 düzeyi üzerine bir araştırma. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi, 22(2), 105–110.

İşleyici, Ö., Morul, F., & Sancak, Y. C. (2012). Van'da tüketime sunulan UHT sterilize inek sütlerinde aflatoksin M1 düzeyinin araştırılması. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi, 23(2), 65–69.

İşleyici, Ö., Sancak, Y. C., Sancak, H., & Yücel, U. M. (2015). Determination of aflatoxin M1 levels in unpackaged sold raw cow's milk. Van Veterinary Journal, 26(3), 151–155.

Jaffiol, C. (2008). Milk and dairy products in the prevention and therapy of obesity, type 2 diabetes and metabolic syndrome. Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine, 192(4), 749–758.

Jay, J. M. (1992). Modern food microbiology (4. baskı). New York, NY: Van Nostrand Reinhold.

Kabak, B., & Ozbey, F. (2012). Aflatoxin M1 in UHT milk consumed in Turkey and first assessment of its bioaccessibility using an in vitro digestion model. Food Control, 28(2), 338–344.

Kamkar, A. (2008). The study of aflatoxin M1 in UHT milk samples by ELISA. Journal of Veterinary Research, 63(2), 7–12.

Kantemir, M. (2007). Ağrı'da tüketilen çiğ ve UHT sütlerde aflatoksin M1 tayini (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van.

Kara, H. H. (2006). Türkiye'de üretilen organik UHT sütün sağlık açısından önemli yağ asitleri bakımından araştırılması (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar.

Karadal, F., Onmaz, N. E., Hızlısoy, H., Yıldırım, Y., Al, S. E., & Gönülalan, Z. (2018). Niğde ilindeki çiğ koyun, keçi ve inek sütlerinde aflatoksin M1 düzeyleri. Kocatepe Veteriner Dergisi, 11(2), 119–125.

Kaya, S. (2014). Mikotoksinler. S. Kaya (Ed.), Veteriner toksikoloji içinde (3. baskı, s. 421–460). Ankara: Medisan Yayınevi.

Kaya, S., Pirinçci, İ., & Bilgili, A. (2002). Mikotoksinler. S. Kaya, İ. Pirinçci, & A. Bilgili (Ed.), Veteriner hekimliğinde toksikoloji içinde. Ankara: Medisan Yayınevi.

Kızıl, M., Demir, P., Erkan, S., & Öksüztepe, G. (2017). Elazığ ilinde satılan çiğ süt ve UHT sütlerde aflatoksin M1 düzeyi. Dicle Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi, 10(2), 115–121.

Kocasari, F. S. (2014). Occurrence of aflatoxin M1 in UHT milk and infant formula samples consumed in Burdur, Turkey. Environmental Monitoring and Assessment, 186(10), 6363–6368.

Koçak, P., Göksoy, E. Ö., Kök, F., Beyaz, D., & Büyükyörük, S. (2015). Occurrence of aflatoxin M1 in flavored UHT milk. Ankara Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi, 62(3), 217–222.

Koyuncu, M., Uzmay, A., & Çınar, G. (2014). Gençlerin organik süt tüketme olasılığı: Ege Üniversitesi araştırması. Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 51(3), 219–227.

Köse, S. B. E., Kocasarı, F. S., & Bayezit, M. (2019). Aflatoxin M1 in UHT cow milk samples collected in Burdur, Turkey. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 7(1), 1–7.

Kumar, P., Mahato, D. K., Kamle, M., Mohanta, T. K., & Kang, S. G. (2017). Aflatoxins: A global concern for food safety, human health and their management. Frontiers in Microbiology, 7, 2170.

Kumar, V. V. (2018). Aflatoxins: Properties, toxicity and detoxification. Nutri Food Science International Journal, 6(5), 555696.

Lee, J. E., Kwak, B. M., Ahn, J. H., & Jeon, T. H. (2009). Occurrence of aflatoxin M1 in raw milk in South Korea using an immunoaffinity column and liquid chromatography. Food Control, 20(2), 136–138.

Madalı, B., & Ayaz, A. (2017). Aflatoxin M1 in dairy products: Exposure and health risks. Hacettepe Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi Dergisi, 4(1), 1–14.

Martins, M. L., & Martins, H. M. (2000). Aflatoxin M1 in raw and ultra high temperature-treated milk commercialized in Portugal. Food Additives & Contaminants, 17(10), 871–874.

Mehenktaş, C. (2019). Süt ve süt ürünlerinde aflatoksin M1. Akademik Gıda, 17(3), 439–443.

Mendonça, C., & Venâncio, A. (2005). Fate of aflatoxin M1 in cheese whey processing. Journal of the Science of Food and Agriculture, 85(12), 2067–2070.

Özkazanç, N., Russel-Sinn, H., Şanlı, Y., & Kaya, S. (1992). Türkiye'nin değişik bölgelerinde üretilen karma yem ve yem hammaddelerinin mikotoksinlerle kirlenme durumunun incelenmesi. Ankara Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi, 39(1-2), 268–290.

Peraica, M., Radić, B., Lucić, A., & Pavlović, M. (1999). Toxic effects of mycotoxins in humans. Bulletin of the World Health Organization, 77(9), 754–766.

Picinin, L. C. A., Cerqueira, M. M. O. P., Vargas, E. A., Lana, Â. M. Q., Toaldo, I. M., & Bordignon-Luiz, M. T. (2013). Influence of climate conditions on aflatoxin M1 contamination in raw milk from Minas Gerais State, Brazil. Food Control, 31(2), 419–424.

Rama, A., Latifi, F., Bajraktari, D., & Ramadani, N. (2015). Assessment of aflatoxin M1 levels in pasteurized and UHT milk consumed in Prishtina, Kosovo. Food Control, 57, 351–354.

Rembiałkowska, E., & Średnicka, D. (2009). Organic food quality and impact on human health. Agronomy Research, 7(2), 719–727.

Ryser, E. T. (2001). Public health concerns. E. H. Marth & J. L. Steele (Eds.), Applied dairy microbiology içinde (2. baskı, s. 397–446). New York, NY: Marcel Dekker.

Santini, A., Raiola, A., Ferrantelli, V., Giangrosso, G., Macaluso, A., Bognanno, M., & Ritieni, A. (2013). Aflatoxin M1 in raw, UHT milk and dairy products in Sicily (Italy). Food Additives & Contaminants: Part B, 6(3), 181–186.

Saraç, E. (2012). Türkiye'de üretilen işlenmiş süt ve bazı süt ürünleri ile Giresun yöresinde üretilen çiğ sütlerin aflatoksin M1 düzeylerinin araştırılması (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar.

Shephard, G. S. (2009). Aflatoxin analysis at the beginning of the twenty-first century. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 395(5), 1215–1224.

Shundo, L., Navas, S. A., Lamardo, L. C. A., Ruvieri, V., & Sabino, M. (2009). Estimate of aflatoxin M1 exposure in milk and occurrence in Brazil. Food Control, 20(7), 655–657.

Siddappa, V., Nanjegowda, D. K., & Viswanath, P. (2012). Occurrence of aflatoxin M1 in some samples of UHT, raw & pasteurized milk from Indian states of Karnataka and Tamilnadu. Food and Chemical Toxicology, 50(11), 4158–4162.

Sifuentes dos Santos, J., França, V., Katto, S., & Santana, E. H. (2015). Aflatoxin M1 in pasteurized, UHT milk and milk powder commercialized in Londrina, Brazil and estimation of exposure. Archivos Latinoamericanos de Nutrición, 65(3), 181–185.

SPSS Inc. (2013). IBM SPSS Statistics for Windows (Sürüm 22.0) [Bilgisayar yazılımı]. Armonk, NY: IBM Corp.

Steyn, P. S., & Stander, M. A. (1999). Mycotoxins with special reference to the carcinogenic mycotoxins: Aflatoxins, ochratoxins and fumonisins. B. Ballantyne, T. C. Marrs, & T. L. M. Syversen (Eds.), General and applied toxicology içinde (2. baskı, Cilt 3, s. 2145–2176). London: Macmillan Reference.

Suliman, S. E., & Abdalla, M. A. (2013). Presence of aflatoxin M1 in dairy cattle milk in Khartoum State-Sudan. Poljoprivreda i Šumarstvo, 59(2), 199–205.

Sumantri, I., Purwanti, F., Nuryono, N., & Agus, A. (2019). Estimation of aflatoxin M1 exposure through consumption of various dairy milk products in Yogyakarta, Indonesia. Jurnal Veteriner, 20(1), 58–64.

Sweeney, M. J., & Dobson, A. D. (1998). Mycotoxin production by Aspergillus, Fusarium and Penicillium species. International Journal of Food Microbiology, 43(3), 141–158.

Tajik, H., Moradi, M., Razavi Rohani, S. M., & Hadian, M. (2016). Determination of aflatoxin M1 in pasteurized and UHT milk in West-Azerbaijan province of Iran. Journal of Food Quality and Hazards Control, 3(1), 37–40.

Tekinşen, K. K., & Eken, H. S. (2008). Aflatoxin M1 levels in UHT milk and kashar cheese consumed in Turkey. Food and Chemical Toxicology, 46(10), 3287–3289.

Tomašević, I., Petrović, J., Jovetić, M., Raičević, S., Milojević, M., & Miočinović, J. (2015). Two year survey on the occurrence and seasonal variation of aflatoxin M1 in milk and milk products in Serbia. Food Control, 56, 64–70.

Tunail, N. (2000). Funguslar ve mikotoksinler. Ankara: Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü Yayınları.

Türk Gıda Kodeksi. (2011). Türk Gıda Kodeksi bulaşanlar yönetmeliği. T.C. Resmî Gazete (Sayı: 28157, 3. Mükerrer, 29 Aralık 2011).

Türk Gıda Kodeksi. (2018). Türk Gıda Kodeksi gıdalardaki mikotoksin seviyelerinin resmi kontrolü için numune alma, numune hazırlama ve analiz metodu kriterleri tebliğı (Tebliğ No: 2018/10). T.C. Resmî Gazete (Sayı: 30361, 15 Mart 2018).

Türk Gıda Kodeksi. (2019). Türk Gıda Kodeksi içme sütleri tebliğı (Tebliğ No: 2019/12). T.C. Resmî Gazete (Sayı: 30699, 27 Şubat 2019).

Türkoğlu, C., & Keyvan, E. (2019). Determination of aflatoxin M1 and ochratoxin A in raw, pasteurized and UHT milk in Turkey. Acta Scientiae Veterinariae, 47, 1626.

Uenishi, K. (2006). Prevention of osteoporosis by foods and dietary supplements. Prevention of osteoporosis by milk and dairy products. Clinical Calcium, 16(10), 1606–1614.

Unusan, N. (2006). Occurrence of aflatoxin M1 in UHT milk in Turkey. Food and Chemical Toxicology, 44(11), 1897–1900.

Van Egmond, H. P. (1994). Aflatoxins in milk. D. L. Eaton & J. D. Groopman (Eds.), The toxicology of aflatoxins: Human health, veterinary, and agricultural significance içinde (s. 365–381). San Diego, CA: Academic Press.

Veldman, A., Meijs, J. A. C., Borggreve, G. J., & Heeres-van der Tol, J. J. (1992). Carry-over of aflatoxin from cows' food to milk. Animal Production, 55(2), 163–168.

Weimer, P. J. (2001). Microbiology of the dairy animal. E. H. Marth & J. L. Steele (Eds.), Applied dairy microbiology içinde (2. baskı, s. 1–58). New York, NY: Marcel Dekker.

World Health Organization (WHO). (1993). Some naturally occurring substances: Food items and constituents, heterocyclic aromatic amines and mycotoxins (IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Cilt 56). Geneva: World Health Organization.

Xiong, J., Peng, L., Zhou, H., Lin, B., Yan, P., Wu, W., ... Zhang, J. (2020). Prevalence of aflatoxin M1 in raw milk and three types of liquid milk products in central-south China. Food Control, 108, 106840.

Yangılar, F. (2020). UHT işlemın süt bileşenleri ve jelleşme üzerine etkileri, piyasası ve tüketici beklentileri. Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 3(2), 133–143.

Yaygın, H., & Demiryol, E. (1980). Süt ve mamüllerinde aflatoxin. Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 18, 99–111.

Yurt, B., & Uluçay, B. (2017). Iğdır'da üretilen sütlerin bazı kimyasal özellikleri ve aflatoksin M1 miktarının belirlenmesi. Türk Doğa ve Fen Dergisi, 6(2), 32–39.

Zheng, N., Sun, P., Wang, J. Q., Zhen, Y. P., Han, R. W., & Xu, X. M. (2013). Occurrence of aflatoxin M1 in UHT milk and pasteurized milk in China market. Food Control, 29(1), 198–201.

BÖLÜM 16

İleri Termal Yönetim Sistemlerinde Nanoakışkan Teknolojileri: Isı Transferi, Performans Artırımı ve Güncel Uygulamalar

Cuma Kılınç [1]

[1] Doç. Dr., Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0009-0008-7783-3111

1. Giriş

Termal yönetimin amacı, bir cihaz veya süreçte oluşan ısının kabul edilebilir sıcaklıklar ve enerji tüketimi altında uzaklaştırılmasıdır. Bu amaç elektronik bir bileşende sıcak noktaların sınırlandırılması, batarya paketinde sıcaklık dağılımının düzenlenmesi veya endüstriyel bir tesiste ısının daha küçük bir değiştiriciyle taşınması biçiminde ortaya çıkabilir. Nanoakışkanlar bu gereksinime, mevcut ısı taşıyıcı sıvının özelliklerini değiştirme olanağı sağlayarak çözüm sunmaktadır. Güncel derlemeler, nanoparçacık türü ve hazırlama koşullarının ısı transferi kadar viskozite ve kararlılık üzerinde de belirleyici olduğunu göstermektedir (Manimaran ve ark., 2025; Rahman ve ark., 2024).

Nanoakışkanın sistem içindeki değeri, başlangıçtaki termal darboğazın niteliğine bağlıdır. Örneğin toplam termal direncin büyük bölümü katı bir temas yüzeyinde oluşuyorsa akışkanın iletkenliğini artırmak sınırlı bir iyileştirme sağlayabilir. Akışkan tarafındaki direnç baskınsa aynı değişiklik daha etkili olabilir. Bu nedenle malzeme geliştirme ile sistem tasarımı arasında bağlantı kurulmalıdır. Hibrit nanoakışkanlar bu bağlantıyı farklı parçacık özelliklerini bir araya getirerek genişletmektedir; ancak bileşen sayısındaki artış tek başına daha iyi bir sonuç anlamına gelmez (Kalsi ve ark., 2025).

Bu bölüm eleştirel bir anlatı derlemesidir; yeni deneysel veri, sistematik tarama sayımları veya meta-analiz sonuçları sunmamaktadır. Yayınlardaki performans değerleri, ilgili deney ve hesaplama koşullarına bağlı bulgular olarak yorumlanmıştır. Bölüm boyunca güncel örnekler ile temel mühendislik bağıntıları ayrılmış; son kısımdaki tasarım ve araştırma önerileri literatürün değerlendirilmesinden türetilen bir sentez olarak sunulmuştur. Böylece farklı ölçeklerdeki sonuçların doğrudan birbirine aktarılması yerine, hangi koşullarda karşılaştırılabilecekleri açıklanmaktadır.

2. Nanoakışkanların yapısı ve sınıflandırılması

2.1 Baz akışkan ve nanoparçacık seçimi

Nanoakışkan, bir baz sıvı içinde dağıtılmış nanometre ölçekli katı parçacıklardan oluşan dispersiyondur. Parçacıkların küçük birincil boyutu, işletme sırasında aynı boyutta kalacakları anlamına gelmez; kümelenme daha büyük hidrodinamik yapılar oluşturabilir. Baz akışkan ile parçacık bu nedenle birlikte tanımlanmalıdır. Su bazlı bir formülasyonun ölçülen özellikleri, aynı parçacığın glikol veya yağ içindeki davranışına doğrudan taşınamaz. Sıcaklık ve derişim de malzemenin tanımının ayrılmaz parçalarıdır (Rahman ve ark., 2024).

Malzeme seçimi için önerilen başlangıç sırası, işletme sıcaklığını ve donma koşullarını belirlemek, yüzeylerle kimyasal uyumu değerlendirmek ve gerekli elektriksel özellikleri tanımlamaktır. Ardından ısıl iletkenlik, özgül ısı, yoğunluk ve viskozite dikkate alınmalıdır. Örneğin doğrudan elektronik bileşenlerle temas

eden bir soğutucu için elektriksel yalıtım önemlidir; kapalı bir soğuk plakada ise sızıntı koşulları ayrıca incelenmelidir. Parçacığın kendi başına yüksek iletkenliğe sahip olması, hazırlanan sıvının bu gereksinimleri karşılayacağını göstermeye yetmez.

2.2 Tek bileşenli hibrit ve manyetik sistemler

Tek bileşenli nanoakışkanlarda bir parçacık türü kullanılırken hibrit sistemlerde iki veya daha fazla tür birlikte değerlendirilir. Hibrit tasarımın gerekçesi, bir bileşenin ısıl taşıma özelliğini diğerinin dispersiyon veya işlevsel özellikleriyle tamamlamaktır. Bununla birlikte, toplam katı miktarı ile bileşenlerin karışım oranı farklı değişkenlerdir. Aynı toplam derişime sahip iki hibrit sıvı farklı karışım oranları nedeniyle farklı davranabilir. Kalsi ve arkadaşlarının derlemesi, hazırlama yöntemlerinin ve uygulama koşullarının hibrit sistemler için önemini vurgulamaktadır (Kalsi ve ark., 2025).

Manyetik nanoakışkanlar, manyetik yanıt veren parçacıkların sıvı içinde dağıtıldığı sistemlerdir. Burada manyetik parçacık kullanılması ile dışarıdan manyetik alan uygulanması ayrı durumlar olarak değerlendirilmelidir. Alan etkisi tartışılacaksa alanın şiddeti, yönü, dağılımı ve üretim biçimi belirtilmelidir. Bu ayrım, yalnızca manyetik malzeme içeren bir ısı borusundaki sonuçların aktif manyetik kontrolün başarısı olarak yorumlanmasını önler. Ayrıca alan üretmek için harcanan enerji, aktif sistemin toplam enerji hesabına katılmalıdır.

Tablo 1. Nanoakışkan seçimi için uygulama odaklı karşılaştırma çerçevesi

Sistem	**Seçimde öne çıkan değişken**	**Doğrulama gereksinimi**
Tek bileşenli	Parçacık türü ve toplam derişim	Baz sıvıya göre termal ve hidrolik değişim
Hibrit	Toplam derişim ve bileşen oranı	Her tek bileşenle eşdeğer koşullarda karşılaştırma
Manyetik	Dispersiyon ve varsa dış alan	Alan enerjisi ve alanın konumsal etkisi
Elektronik soğutucu	Elektriksel uyum ve kanal boyutu	Kaçak, birikim ve uzun süreli çevrim
Batarya soğutucu	Sıcaklık homojenliği ve geçici yük	Hızlı şarj ve farklı ortam koşulları

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 1, deneysel performans sıralaması sunmamakta olup, bu bölümde önerilen teorik bir seçim çerçevesini ortaya koymaktadır. Bir formülasyonun başarısı hedef uygulama için gerekli doğrulama tamamlandıktan sonra değerlendirilmelidir.

3. Hazırlama karakterizasyon ve kararlılık

3.1 Hazırlama işlemlerinin tekrarlanabilirliği

Nanoakışkanlar genel olarak parçacığın sıvı içinde sentezlendiği tek aşamalı (one step) veya önceden üretilmiş tozların sıvıya dağıtıldığı iki aşamalı (two steps) yaklaşımlarla hazırlanır. Karıştırma, ultrasonik işlem, yüzey aktifleştirici kullanımı ve pH düzenlemesi dispersiyonun hazırlanmasında değerlendirilen araçlardır. Ancak hazırlama işlemi sonunda görünür çökelmenin bulunmaması, bütün çalışma süresi boyunca kararlılık sağlandığını göstermez (Manimaran ve ark., 2025; Rahman ve ark., 2024).

Tekrarlanabilir bir hazırlama kaydında parçacık tedarikçisi, saflığı, birincil boyut dağılımı, tartım yöntemi, baz sıvı bileşimi ve katkı miktarı yer almalıdır. Ultrasonik işlem yalnızca dakika cinsinden belirtilmemeli; cihaz türü, uygulanabilen güç ve işlem sırasında sıcaklık kontrolü de açıklanmalıdır. Yüzey aktifleştirici kullanılan deneylerde, parçacık içermeyen fakat aynı katkıyı içeren bir kontrol sıvısı hazırlanması önerilir. Bu kontrol, parçacık etkisi ile katkı maddesi etkisinin ayrılmasını kolaylaştırır.

3.2 Kararlılığın çoklu ölçümlerle incelenmesi

Manimaran ve arkadaşları, su bazlı hibrit sistemlerde kararlılık ile ısıl iletkenlik arasındaki ilişkiyi değerlendirmiş; pH, ultrasonik işlem, parçacık özellikleri ve yüzey düzenlemesinin önemini ele almıştır (Manimaran ve ark., 2025). Bu çerçevede zeta potansiyeli, parçacık boyutu dağılımı, optik absorbans ve zamana bağlı çökelme gözlemleri birlikte kullanılabilir. Tek bir ölçüm yöntemiyle tüm kararlılık mekanizmalarını açıklamak mümkün değildir. Bu nedenle özellikle optik karakterizasyon süreçlerinde süspansiyon derişimi ve kararlılık test koşulları standartlaştırılmalıdır.

Bu bölümde önerilen karakterizasyon yaklaşımı üç zaman düzeyini içerir: hazırlama sonrası başlangıç ölçümü, bekleme sonrası depolama ölçümü ve gerçek cihazda dolaşım sonrası işletme ölçümü. İşletme ölçümünde yalnızca sıvı örneği değil, kanal ve bağlantı yüzeyleri de incelenmelidir. Başlangıç ile son durum arasında viskozite, iletkenlik veya boyut dağılımı değişmişse performans farkı yalnızca sıcaklığa bağlanmamalıdır. Duruş ve yeniden çalıştırma denemeleri, sürekli akışın gizleyebildiği çökelme sorunlarını görünür kılabilir.

3.3 Güncel bir çok bileşenli formülasyon örneği

Cheraghian ve arkadaşları 2026 yılında MWCNT, CeO_2 ve Fe_3O_4 içeren hibrit ve üç bileşenli su bazlı dispersiyonların termofiziksel ve elektriksel özelliklerini

deneysel olarak incelemiştir. Yürütülen çalışmada toplam hacimsel derişim ve bileşen oranları değiştirilmiş; ısıl iletkenlik, viskozite, elektriksel iletkenlik ve morfoloji birlikte değerlendirilmiştir. Bulgular, ısıl ve elektriksel davranış için aynı bileşimin en iyi sonucu vermeyebileceğini göstermektedir (Cheraghian, Adogbeji, Govinder ve Sharifpur, 2026).

Bu örnekten çıkarılabilecek tasarım sonucu, çok bileşenli formülasyonun optimizasyonunda tek bir özellik yerine uygulamanın gerektirdiği özellikler kümesinin kullanılmasıdır. Söz konusu çalışma akışkan özelliklerini karakterize etmektedir; tek başına bir batarya paketinin, ısı değiştiricisinin veya soğutma çevriminin doğrulanmış performansı olarak ele alınmamalıdır. Cihaz ölçeğindeki karar için ayrıca akış, ısı yükü ve işletme süresi altında sınama gerekir (Cheraghian ve ark., 2026).

4. Isı transferinin fiziksel ve mühendislik temelleri

4.1 Etkin özellikler ve mekanizma yorumları

Nanoparçacık ilavesi katı ve sıvı fazların birlikte oluşturduğu etkin özellikleri değiştirir. Bu değişim, parçacık malzemesi kadar biçimine, dağılımına ve arayüz koşullarına da bağlıdır. Isıl iletkenlik artışını her durumda olağanüstü bir nanoölçek mekanizmasına bağlamak uygun değildir. Uluslararası karşılaştırma çalışmasında aynı dispersiyonların 30'dan fazla kuruluş tarafından ölçülmesi, incelenen örneklerde etkin ortam yaklaşımıyla uyumlu sonuçlar vermiş ve anormal bir iletkenlik artışının zorunlu olmadığını göstermiştir (Buongiorno ve ark., 2009).

Bu bulgu güncel nanoakışkanların bütününün aynı davranacağı anlamına gelmez; ölçülen artışın önce uygun referans ve klasik taşıma çerçevesiyle sınanması gerektiğini gösterir. Brown hareketi, parçacık etkileşimleri ve arayüz etkileri açıklama adaylarıdır; ancak deneysel kanıt olmadan birinin baskın mekanizma ilan edilmesi doğru değildir. İletkenlik ölçümü ile bir kanalda elde edilen taşınım katsayısı da farklı büyüklüklerdir. Akışkanın değişmesi Reynolds ve Prandtl sayıları ile sıcaklık alanını da etkileyebilir (Buongiorno ve ark., 2009).

4.2 Isıl görev ve direnç bütçesi

Tek fazlı bir deneyde akışkana aktarılan ısıl güç, kütlesel debi, özgül ısı ve giriş–çıkış sıcaklık farkının çarpımıyla bulunur. Bu hesapta akışkanın ilgili sıcaklıktaki özgül ısısı kullanılmalıdır. Isıtıcı elektriksel gücünün tamamının akışkana geçtiği varsayımı, çevreye kayıp ölçülmeden kabul edilmemelidir. İki akışkanlı bir değiştiricide sıcak ve soğuk taraf enerji hesaplarının uyuşması, deneyin güvenilirliğini değerlendirmek için kullanılır.

Yerel taşınım katsayısı, duvar ile akışkan arasındaki uygun sıcaklık farkına ve ısı akısına bağlıdır. Toplam ısı geçiş katsayısı ise iki akışkanın taşınım dirençlerini, duvarı ve varsa kirlenme dirençlerini birlikte temsil eder. Bu ayrım

nedeniyle bir çalışmadaki toplam katsayı artışı başka bir çalışmadaki yerel katsayı artışıyla eşdeğer kabul edilemez. Tasarım açısından önerilen yaklaşım, önce direnç bütçesini çıkarmak ve nanoakışkanın değiştirebileceği payı belirlemektir.

4.3 Karşılaştırma koşulunun seçimi

Aynı Reynolds sayısı, aynı hacimsel debi ve aynı pompalama gücü farklı karşılaştırma koşullarıdır. Viskozite ve yoğunluk değiştiğinde aynı Reynolds sayısını korumak için hızın değiştirilmesi gerekebilir. Bu durumda ölçülen ısı transferi artışının bir bölümü artan akış hızından kaynaklanabilir. Aynı hacimsel debide karşılaştırma ise pompa yükünün değişimini görünür kılar. Son kullanım açısından en açıklayıcı koşul, aynı termal görevin hangi toplam enerjiyle yerine getirildiğidir.

Bu bölüm için önerilen raporlama biçimi, araştırma sonuçlarını en az iki düzeyde sunmaktır: kontrollü bir akış karşılaştırması ve sistemin gerçek pompa sınırı altında karşılaştırılması. Boyutsuz sayılar hesaplanırken kullanılan yoğunluk, viskozite, özgül ısı ve iletkenlik değerleri açıklanmalıdır. Ayrıca farklı çalışmalardaki derişimlerin kütle veya hacim esasına göre verildiği kontrol edilmelidir. Kütlece yüzde ile hacimce yüzde, parçacık ve sıvı yoğunlukları dikkate alınmadan aynı kabul edilemez.

5. Performans artırımının değerlendirilmesi

5.1 Termal ve hidrolik ölçütler

Bir nanoakışkan için iletkenlik artışı, taşınım katsayısı artışı, Nusselt sayısı, toplam ısı geçiş katsayısı ve termal direnç ayrı ayrı raporlanabilir. Hidrolik tarafta ise basınç kaybı, debi ve pompa verimi gerekir. Akışkana aktarılan hidrolik güç, basınç farkı ile hacimsel debinin çarpımı olarak hesaplanır; sisteme ait elektriksel güç tüketiminin belirlenmesi için ise bu hidrolik gücün pompa ve motor verimleriyle ilişkilendirilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla basınç kaybı sabit tutulurken yalnızca debi değiştirilmesi de enerji tüketimini değiştirebilir.

Birleşik performans indisleri, termal kazancı sürtünme cezasıyla birlikte ifade etmek için yararlıdır. Ancak bir indiste kullanılan üs ve normalizasyon, belirli geometri ve akış varsayımlarına dayanabilir. İndisin birden büyük çıkması tek başına ekonomik uygulanabilirlik veya bütün sistemde enerji tasarrufu kanıtı sayılmamalıdır. Gerçek cihaz için fanlar, ikincil soğutma devresi, alan üreticileri ve yardımcı ekipmanın tüketimi de değerlendirmeye alınmalıdır.

Tablo 2. Başlıca performans göstergeleri ve yorum sınırları

Gösterge	Yanıtladığı soru	Tek başına göstermediği sonuç
Isıl iletkenlik	Akışkan ısıyı ne ölçüde iletir	Cihaz ölçeğindeki net enerji verimliliği
Isı transfer katsayısı	Akışkan tarafı taşınım ne düzeydedir	Bütün dirençlerin azalması
Termal direnç	Aynı yükte sıcaklık farkı nedir	Farklı yüklerde aynı davranış
Basınç kaybı	Dolaşımdaki hidrolik kayıpların etkisi nedir	Pompanın elektriksel tüketimi
En yüksek sıcaklık	Sıcak nokta ne düzeydedir	Bütün yüklerde güvenli çalışma
Sıcaklık farkı	Dağılım ne kadar homojendir	Uzun süreli güvenilirlik
Ömür boyu maliyet	Yatırım ve işletme toplamı nedir	Çevresel üstünlük

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

5.2 Açıklayıcı enerji hesabı

Yöntemi göstermek için varsayımsal bir kapalı devre düşünülsün. Baz sıvıda hacimsel debi 0,0001 $m^3\ s^{-1}$, basınç farkı 20.000 Pa ve pompa-motor toplam verimi 0,50 olsun. Elektriksel pompa gücü bu koşullarda 4 W olur. Aynı debide nanoakışkan basınç farkını 26.000 Pa'a çıkarıyorsa ve verim sabit kalıyorsa tüketim 5,2 W'a yükselir. Bu örnek herhangi bir yayından alınmış deneysel sonuç değildir; basınç kaybındaki yüzde 30 artışın sabit debi ve verimde pompa gücüne nasıl yansıdığını açıklamaktadır.

Termal direnç aynı uygulamada azalmış olsa bile sistem düzeyindeki değerlendirme henüz tamamlanmış değildir. Azalan direnç, daha düşük debide aynı bileşen sıcaklığını korumaya olanak sağlayabilir; bu yeni çalışma noktasında pompa gücü yeniden hesaplanmalıdır. Ayrıca gerçek pompa verimi debiyle değişebilir. Bu nedenle nanoakışkanın avantajı ilk karşılaştırmadaki güç cezasından veya yalnızca sıcaklık düşüşünden çıkarılmamalı, yeniden optimize edilmiş işletme koşullarında belirlenmelidir.

5.3 Ekserji ve çok amaçlı değerlendirme

Enerji dengesi miktarı izlerken ekserji yaklaşımı enerjinin iş üretme potansiyelini değerlendirir. Bir soğutma veya ısı geri kazanım sürecinde sıcaklık farkları ve akış sürtünmesi tersinmezlik oluşturur. Tasarımın değerlendirilmesi için referans çevre sıcaklığı ve kontrol hacmi açıklanmalı; akışkan değişimiyle oluşan termal ve hidrolik etkiler aynı çerçevede hesaplanmalıdır. Pompalama cezası enerji bilançosuna katılmış olsa da ekserji hesabında ilgili sınırlar ayrıca tutarlı kurulmalıdır.

Bu bölümde önerilen çok amaçlı seçimde en yüksek sıcaklık, basınç kaybı, uzun süreli özellik değişimi ve maliyet birlikte izlenir. Bir tasarım bu ölçütlerin hepsinde üstün değilse Pareto yaklaşımıyla farklı ödünleşimler görülebilir. Nihai seçim, cihazın izin verilen sıcaklığı ve enerji bütçesi gibi uygulama sınırlarına göre yapılmalıdır. Belirsizlik aralıkları içinde birbirinden ayrılmayan iki formülasyon arasında kesin bir üstünlük sıralaması kurulması önerilmez.

6. Isı değiştiricilerinde uygulamalar

Çift borulu, plakalı veya kanallı değiştiricilerde nanoakışkan uygulamaları, mevcut yüzey alanında daha yüksek ısıl görev veya aynı görev için daha küçük bir cihaz hedefleyebilir. Ancak kazanım, akışkanın bulunduğu tarafın toplam dirence katkısıyla sınırlanır. Değiştiricinin diğer tarafı baskınsa yalnızca nanoakışkan tarafını iyileştirmek toplam kapasiteyi beklenenden az etkileyebilir. Bu nedenle cihazın genel boyutlandırması ve pompa çalışma noktası birlikte yeniden değerlendirilmelidir.

Sözen, Güçlüer ve Kılınç'ın hBN/su çalışması, malzeme etkisinin akış düzeninden ayrı düşünülemeyeceğini gösteren bir örnektir. Kütlece % 2 hBN ve % 0,5 Triton X-100 içeren dispersiyonun kullanıldığı çift borulu deneylerde toplam ısı geçiş katsayısında paralel akış için ortalama % 48,78; karşıt akış için % 0,36 iyileşme bildirilmiştir (Sözen, Güçlüer ve Kılınç, 2019). Bunlar çalışmanın kendi referansına göre sonuçlardır ve her hBN uygulaması için beklenen kazanç olarak kullanılmamalıdır.

Aynı formülasyonda akış düzenine bağlı farklı sonuçlar, literatürden tek bir maksimum artış seçerek tasarım yapılmasının sorununu ortaya koyar. Deneyde giriş sıcaklıkları, debiler, ölçüm belirsizliği ve enerji dengesi birlikte okunmalıdır. Uygulama kararı için bu bölümde önerilen ek sınamalar, tekrarlanan termal çevrimler, duruş sonrası performans ve yüzey birikiminin incelenmesidir. Özellikle dar akış geçitlerinde kısa dönem kazanç ile bakım gereksinimi ayrı raporlanmalıdır.

7. Isı boruları ve iki fazlı termal taşıma

Isı borularında ısı, evaporatörde buharlaşma ve kondenserde yoğuşma yoluyla taşınır. Termosifon tipinde yoğuşan sıvının geri dönüşünde yerçekimi kullanılır;

fitilli tipte kapiler yapı önem taşır. Dolayısıyla parçacık katkısının etkisi yalnızca sıvı iletkenliğiyle açıklanamaz. Dolum oranı, yönelim, ısı girdisi, kaynama yüzeyi ve sıvının geri dönüş koşulları değerlendirmede yer almalıdır. Yardımcı kondenser soğutmasının enerji tüketimi de bütün sistem hesabında korunmalıdır.

Kılınç'ın termosifon araştırmasında suya kütlece % 2 Fe_3O_4 ve % 0,2 Triton X-100 eklenmiş, hazırlanan dispersiyon yaklaşık dört saat ultrasonik banyoda işlenmiştir. Bir metre uzunluk ve 15 mm dış çapa sahip ısı borusu farklı evaporatör güçleri ile kondenser soğutma suyu debilerinde denenmiş; en yüksek koşulda ısıl verimde yaklaşık % 30 artış bildirilmiştir (Kılınç, 2021). Bu sonuç kullanılan cihaz ve deney koşullarıyla sınırlıdır; aktif dış manyetik alanın sağladığı bir iyileşme şeklinde yorumlanmamalıdır.

İki fazlı düzenekler için bu bölümde önerilen karşılaştırma, hem ilk kullanım hem de tekrarlanan çevrimlerden sonraki termal direnci izlemektir. Akışkan içindeki parçacık miktarı ve evaporatör yüzeyindeki birikim birlikte incelenirse başlangıçtaki performansın sürdürülüp sürdürülmediği anlaşılabilir. Yüzeyde birikme kimi koşullarda ıslanabilirliği veya kaynama davranışını değiştirebilir; aynı süreç akış ve geri dönüş için olumsuz da olabilir. Bu yüzden birikimin bütün sistemlerde yararlı olduğu varsayılmamalıdır.

8. Elektronik soğutma ve mikrokanallar

Elektronik sistemlerde hedef, yüksek yerel ısı akıları altında en sıcak bileşeni sınırlandırmaktır. Ortalama çıkış sıcaklığı, sıcak noktayı tek başına temsil etmez. Mikrokanallarda geometrinin küçük olması ısı transferi için avantaj sağlayabilir; buna karşılık dağılım bozukluğu veya kanal tıkanması bütün soğutucu performansını etkileyebilir. Bu alanda tek fazlı dolaşım ile kaynamalı soğutmanın güvenilirlik gereksinimleri ayrıca ele alınmalıdır.

Adio ve arkadaşlarının 2025 tarihli derlemesi, mikrokanallarda nanoparçacık özellikleri, kanal geometrisi ve akış koşullarının birlikte değerlendirilmesi gerektiğini belirtmektedir. Isı transfer katsayısı ve kritik ısı akısında bildirilen artışlara rağmen kararlılık, kirlenme, tıkanma ve pompalama gereksinimi uygulama sınırlamalarıdır (Adio, Atofarati, Muritala, Huan ve Veeredhi, 2025). Kritik ısı akısındaki artış, aynı oranda sürekli kullanılabilir soğutma kapasitesi veya güvenli işletme aralığı anlamına gelmez.

Elektronik soğutma tasarımı için önerilen deney matrisi, aynı giriş sıcaklığı ve ısı yükünde baz sıvı ile nanoakışkanın karşılaştırılmasını, ardından aynı pompa tüketiminde sınamayı içerir. Yüzey sıcaklığı birden fazla noktadan ölçülmeli ve kanal boyunca basınç izlenmelidir. Kontrol sisteminin tanıyabileceği arıza belirtileri de araştırılmalıdır. Örneğin sıcaklık yükselişi ile basınç değişiminin birlikte izlenmesi, yalnızca sıcaklık sensörüyle görülemeyen dolaşım sorunlarının değerlendirilmesine yardımcı olabilir.

9. Batarya termal yönetimi

9.1 Sıcaklık ve homojenlik hedefleri

Batarya termal yönetiminde hem en yüksek hücre sıcaklığı hem de hücreler arasındaki sıcaklık farkı önemlidir. Soğutucu seçimi, hücre kimyası, paket düzeni, şarj-deşarj yükü ve ortam koşullarıyla birlikte yapılmalıdır. Bütün bataryalar için tek bir ideal sıcaklık aralığı vermek yerine üretici ve hücreye özgü işletme sınırları kullanılmalıdır. Girişteki soğutucu sıcaklığı ve debi gibi işletme değişkenleri malzeme kadar etkili olabilir.

Gasmelseed ve arkadaşları tarafından 2024 yılında yapılan derlemede nanoakışkanlı batarya sistemleri için incelenen çalışmalarda % 2,9–30,5 aralığında termal iyileşme ve % 14–70 aralığında basınç kaybı artışı bildirilmiştir (Gasmelseed, Ismael, Said, Ahmad ve Osman, 2024). Bu aralıklar farklı düzenek ve koşulları kapsayan literatür özetidir; bir batarya tasarımı için garanti veya ortak bir ortalama değildir. Sonuçlar termal kazancın hidrolik maliyetle birlikte değerlendirilmesini desteklemektedir.

9.2 Hibrit mimariler ve akıllı kontrol

2026 tarihli Le ve arkadaşlarının derlemesi, nanoakışkanlı dolaylı sıvı soğutma, nanoparçacık katkılı faz değişim malzemeleri ve nanoakışkan destekli ısı borularını kontrol gereksinimleriyle birlikte ele almaktadır (Le, Tong ve Lee, 2026). Sıvı soğutucu ile faz değişim malzemesi aynı kavram değildir. Birincisi dolaşımla ısı taşırken ikincisi belirli bir sıcaklık aralığında enerji depolar; birleşik mimaride bu işlevler ayrı hesaplanmalıdır.

Bu bölümde önerilen kontrol yaklaşımı, anlık sıcaklık yanında şarj yükü, ortam sıcaklığı ve soğutma kapasitesini kullanarak debiyi ayarlamaktır. Ancak kontrolün başarı ölçütü yalnızca daha düşük sıcaklık değildir; pompa tüketimi ve sıcaklık homojenliği de izlenmelidir. Termal kaçak gibi arıza olaylarında normal işletme soğutmasının iyileşmesi tek başına güvenlik kanıtı oluşturmaz. Arıza koşulları için ayrıca tanımlanmış ve doğrulanmış testler gerekir (Le ve ark., 2026).

10. Güneş enerjisi sistemleri ve ısıl depolama

Nanoakışkanlar güneş sistemlerinde iki farklı rol üstlenebilir. Geleneksel bir kolektörde ısı taşıyıcı sıvı olarak kullanılırken doğrudan soğurmalı bir tasarımda optik özellikleri de enerji yakalanmasını etkiler. Bu ikinci durumda yalnızca ısıl iletkenlik yeterli bir seçim ölçütü değildir. Soğurma ve saçılma, optik yol uzunluğu ve ışınımın sıvı içindeki dağılımı birlikte değerlendirilmelidir. Fotovoltaik-termal uygulamada ise elektrik üretimi ve kullanılabilir ısı ayrı performans çıktılarıdır.

Hussein, Awad ve Ali 2024 yılında Irak koşullarında düzlemsel kolektörlerin CuO/su nanoakışkanıyla performansını deneysel olarak incelemiştir. Deneylerin

Ocak/Mart ayları arasında ve farklı debiler altında gerçekleştirilmesi, sonucun saha koşullarıyla birlikte okunması gerektiğini göstermektedir (Hussein, Awad ve Ali, 2024). Kolektör çıkış sıcaklığının yükselmesi yararlı olabilir; ancak termal verim için taşınan ısı, kolektör alanı ve eşzamanlı ışınım birlikte hesaplanmalıdır. Bir saatlik en yüksek sonuç mevsimlik enerji kazancının yerine geçmez.

Güneş sistemleri için bu bölümde önerilen değerlendirme, günlük faydalı ısıyı ve yardımcı elektrik tüketimini bütünleştirmek, ışınım farklılığını kontrol etmek ve duruş dönemlerindeki dispersiyon değişimini izlemektir. Isıl depolama ile birleştirilen tasarımlarda ayrıca şarj ve deşarj süreleri, erişilebilir depolama kapasitesi ve ısı kaybı ölçülmelidir. Nanoakışkanlı kolektör ile nanoparçacık katkılı katı veya kapsüllenmiş depolama ortamının etkileri ayrı sınanırsa birleşik sistemin hangi bileşeninden kazanç sağlandığı daha açık görülebilir.

11. Modelleme deneysel doğrulama ve belirsizlik

11.1. Model karmaşıklığının gerekçelendirilmesi

Sayısal modelde ilk karar, dispersiyonun etkin özelliklere sahip tek bir akışkan olarak mı yoksa parçacık taşınımının ayrıca temsil edildiği bir sistem olarak mı ele alınacağıdır. Tek akışkan yaklaşımı hesaplama açısından elverişlidir; ancak yerel derişim değişimi, çökelme veya faz ayrışmasının önemli olduğu bir durumda eksik kalabilir. Daha karmaşık yaklaşımın seçimi de otomatik doğruluk sağlamaz. İlave modellerin parametreleri ve sınır koşulları deneysel kanıtla desteklenmelidir.

Doğrulama için baz sıvı deneyleri, ağ duyarlılığı ve enerji dengesi birlikte kullanılması önerilir. Nanoakışkan sonuçlarının yalnızca bir literatür korelasyonuyla uyuşması, farklı bir cihazın doğrulandığı anlamına gelmez. Özellikler mümkün olduğunda kullanılan dispersiyondan ve ilgili sıcaklık aralığında ölçülmelidir. Ölçülmüş özelliklerle hesaplanan sonuç ile varsayılan özelliklerle elde edilen sonuç ayrı raporlanırsa modelin hangi bilgiye duyarlı olduğu görülebilir.

11.2. Veri odaklı modellerin sınırları

Veri odaklı modeller, formülasyon ve işletme değişkenleriyle özellik veya cihaz performansı arasında ilişki kurmak için kullanılabilir. Hibrit nanoakışkan literatüründe yapay sinir ağları ve diğer makine öğrenme yaklaşımları bu amaçla ele alınmaktadır (Kalsi ve ark., 2025). Ancak farklı deneylerden birleştirilen verilerde kullanılan ölçüm yöntemi, baz akışkan ve hazırlama koşulu kayıtlı değilse model açıklanmayan değişkenleri öğrenebilir. Bu durumda yüksek uyum değeri tek başına fiziksel genellenebilirliği göstermez.

Bu bölümde önerilen doğrulama stratejisi, aynı deney serisinin benzer noktalarını eğitim ve test içine rastgele dağıtmak yerine, bağımsız formülasyon veya işletme aralığıyla sınamaktır. Normalleştirme ve özellik seçimi eğitim

verisinde yapılmalı; test verisi model seçimine katılmamalıdır. Tahmin aralığı dışında kalan derişim ve sıcaklıklar için sonuçlar ekstrapolasyon olarak belirtilmelidir. Açıklanabilirlik analizleri değişken etkisini incelemeye yardımcı olabilir, ancak korelasyonları nedensellik kanıtına dönüştürmez.

11.3. Belirsizlik ve minimum raporlama

Isı transfer katsayısı sıcaklık farkından hesaplandığı için, küçük bir sıcaklık farkında sensör hatalarının göreli etkisi büyüyebilir. Basınç farkı ve debi ölçümlerindeki belirsizlik de pompalama hesabına taşınır. Birleşik belirsizlik değerlendirilirken giriş değişkenlerinin bağımsız olduğu varsayımı açıkça belirtilmeli; ortak kalibrasyon veya ölçüm kaynaklarından doğan ilişkiler gerekiyorsa hesaba katılmalıdır. Sonuçlar yalnızca ortalama olarak değil, tekrarlar ve belirsizlikleriyle sunulmalıdır.

Tablo 3. Bu bölümde önerilen minimum deneysel raporlama kümesi

Başlık	**Raporlanacak bilgiler**
Malzeme	Baz sıvı, parçacık türü, boyut dağılımı ve saflık
Formülasyon	Kütle veya hacim derişimi, hibrit oran, katkılar
Hazırlama	Karıştırma, ultrasonik koşullar, sıcaklık ve bekleme
Karakterizasyon	İletkenlik, viskozite, yoğunluk, özgül ısı ve kararlılık
Düzenek	Geometri, yüzey malzemesi, sensör yerleri ve yalıtım
İşletme	Isı yükü, giriş sıcaklığı, debi ve çalışma süresi
Karşılaştırma	Referans sıvı ve sabit tutulan çalışma koşulları
Güvenilirlik	Tekrar sayısı, enerji dengesi ve belirsizlik
Uzun süre	Özellik değişimi, birikme, bakım ve yeniden çalıştırma

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

12. Endüstriyel uygulanabilirlik ve araştırma öncelikleri

Endüstriyel karar için kısa dönem performans artışının ekonomik ve işletmesel karşılığı belirlenmelidir. Nanoakışkan üretimi, kalite kontrolü, depolama, pompa ve conta uyumu, bakım, yenileme ve kullanım sonu işlemleri maliyet hesabında yer almalıdır. Çevresel üstünlük ise yalnızca çalışma sırasında enerji tüketiminin azalmasından çıkarılamaz. Malzeme üretimi ve bertaraf aşamalarını kapsayan, aynı termal hizmete dayalı bir yaşam döngüsü karşılaştırması yapılmalıdır.

Bu bölümün literatür sentezinden türetilen ilk araştırma önceliği, uzun süreli ve tekrarlanabilir dolaşım deneyleridir. Mikrokanal derlemesi ile hibrit sistem derlemesinde ele alınan kararlılık ve uygulama sorunları, yalnızca daha yüksek anlık katsayı arayışının yeterli olmadığını göstermektedir (Adio ve ark., 2025; Kalsi ve ark., 2025). İkinci öncelik, benzer formülasyonların farklı laboratuvarlarda aynı tanımlanmış koşullarda sınanmasıdır. Uluslararası iletkenlik karşılaştırmasının yaklaşımı bu gereksinim için öğretici bir örnektir (Buongiorno ve ark., 2009).

Üçüncü öncelik, malzeme ve geometrinin ortak optimizasyonudur. Bir formülasyonun düz bir kanaldaki üstünlüğü kanatçıklı, fitilli veya dar geçitli bir cihazda aynı kalmayabilir. Dördüncü öncelik, kullanılan baz sıvının da optimize edildiği adil karşılaştırmalardır. Nanoakışkanla birlikte debi, geometri veya kontrol stratejisi değiştirilmişse, karşılaştırma sıvısına da benzer tasarım serbestliği tanınmalıdır. Böylece bütün iyileşme yanlışlıkla parçacık katkısına yüklenmez.

Son öncelik, uygulamaya özgü kabul ölçütlerinin önceden belirlenmesidir. Örneğin bir batarya soğutucusunda izin verilen sıcaklık farkı, bir elektronik cihazda en sıcak nokta ve bir kolektörde yıllık faydalı enerji farklı hedeflerdir. Her hedef için ölçülebilir başarı koşulu, izin verilen enerji cezası ve bakım aralığı tanımlanmalıdır. Bu yaklaşım, nanoakışkanın laboratuvardaki özellik iyileştirmesini gerçek hizmet koşullarındaki yarara bağlar.

13. Sonuç

Nanoakışkanlar, ileri termal yönetimde malzeme özelliklerini uygulamanın gereksinimlerine göre düzenleme olanağı sunmaktadır. Tek bileşenli, hibrit ve manyetik dispersiyonların yararı; baz sıvı, parçacık bileşimi, hazırlama yöntemi, sıcaklık ve cihaz geometrisinin birlikte değerlendirilmesine bağlıdır. Güncel literatürün bu bölümdeki değerlendirmesi, yüksek ısıl iletkenlik veya taşınım katsayısının tek başına bir teknolojinin üstünlüğünü göstermediğini ortaya koymaktadır.

Isı değiştiricileri ve ısı borularındaki deneysel örnekler, kazanımların cihaz ve çalışma koşullarına bağlı olduğunu göstermektedir. Elektronik soğutma ve bataryalarda sıcaklık homojenliği ile güvenilirlik; güneş sistemlerinde ise saha

koşulları ve toplam faydalı enerji ayrıca önem taşımaktadır. Bu nedenle uygulama kararı aynı termal hizmet altında toplam enerji, uzun süreli kararlılık ve maliyetin değerlendirilmesine dayanmalıdır.

Araştırmaların sonraki aşaması için önerilen yön, yeni parçacık kombinasyonlarını yalnızca anlık termal sonuçlarla sıralamak yerine, ölçüm belirsizliği açıklanmış deneyler, bağımsız model doğrulaması ve uzun süreli işletme kanıtı üretmektir. Bu kanıtlar tamamlandığında nanoakışkanın hangi uygulamada, hangi derişimde ve hangi bakım koşullarında yararlı olduğu daha güvenilir biçimde belirlenebilir.

Kaynakça

Adio, S. A., Atofarati, E. O., Muritala, A. O., Huan, Z. & Veeredhi, V. R. (2025). Nanofluids flow boiling and convective heat transfer in microchannels: a systematic review and bibliometrics analysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 150*, 8879–8911. doi:10.1007/s10973-025-14265-x

Buongiorno, J., Venerus, D. C., Prabhat, N., McKrell, T., Townsend, J., Christianson, R., … Zhou, S. Q. (2009). A benchmark study on the thermal conductivity of nanofluids. Journal of Applied Physics, 106(9), 094312. doi:10.1063/1.3245330

Cheraghian, G., Adogbeji, V. O., Govinder, C. & Sharifpur, M. (2026). Experimental investigations of the thermophysical properties of mwcnt–ceo$_2$–fe$_3$o$_4$ nanofluids. *Frontiers in Energy Research, 14*, 1812366. doi:10.3389/fenrg.2026.1812366

Gasmelseed, A., Ismael, M. A., Said, M. A., Ahmad, F. & Osman, S. (2024). Thermal management strategies for lithium-ion batteries in electric vehicles: a comprehensive review of nanofluid-based battery thermal management systems. *Results in Engineering, 24*, 103339. doi:10.1016/j.rineng.2024.103339

Hussein, A. M., Awad, A. T. & Ali, H. H. M. (2024). Evaluation of the thermal efficiency of nanofluid flows in flat plate solar collector. *Journal of Thermal Engineering, 10*(2), 299–307. doi:10.18186/thermal.1448578

Kalsi, S., Kumar, S., Kumar, A., Alam, T., Sharma, A. & Yadav, A. S. (2025). A review on hybrid nanofluids for heat transfer: advancements, synthesis, challenges and applications. *Discover Applied Sciences, 7*, 698. doi:10.1007/s42452-025-07141-8

Kılınç, C. (2021). Manyetik nanoakışkanın termosifon tipi ısı borusunun performansına etkisi. *Politeknik Dergisi, 24*(3), 1309–1316. doi:10.2339/politeknik.993935

Le, T. D., Tong, L.-X., & Lee, M.-Y. (2026). Nanofluid-based cooling strategies for intelligent btmss in electric vehicles: recent advances, thermal safety, and control-oriented architectures. Electronics, 15(11), 2445. doi:10.3390/electronics15112445

Manimaran, M., Norizan, M. N., Kassim, M. H. M., Adam, M. R., Abdullah, N. & Norrrahim, M. N. F. (2025). Critical review on the stability and thermal conductivity of water-based hybrid nanofluids for heat transfer applications. *RSC Advances, 15*, 14088–14125. doi:10.1039/D5RA00844A

Rahman, M. A., Hasnain, S. M. M., Pandey, S., Tapalova, A., Akylbekov, N. & Zairov, R. (2024). Review on nanofluids: preparation, properties, stability, and thermal performance augmentation in heat transfer applications. *ACS Omega, 9*(30), 32328–32349. doi:10.1021/acsomega.4c03279

Sözen, A., Güçlüer, S. & Kılınç, C. (2019). The heat transfer enhancement of concurrent flow and counter current flow concentric tube heat exchangers by using hexagonal boron nitride/water nanofluid. *Thermal Science, 23*(6B), 3917–3928. doi:10.2298/TSCI180213283S

BÖLÜM 17

Ev Tipi Elektrikli Araç Şarj Cihazlarının Dağıtım Şebekelerinde Güç Kalitesine Etkileri

Özdemir Deniz[1]

[1] Dr. Öğr. Üyesi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Isparta Organize Sanayi Bölgesi Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü,
ORCID: 0000-0002-8168-9668

1. GİRİŞ

Elektrikli araçlar (EA) marjinal bir teknoloji olmaktan çıkıp sıradan bir ev aletine dönüşme yolunda ilerlemektedir. Dikkat çekici olan, EA şarjında kullanılan enerjinin büyük bölümünün kamuya açık hızlı şarj istasyonlarından değil, evden sağlanmasıdır. Bu şarj çoğunlukla gece boyunca, abonenin kendi bağlantı noktasına bağlı Seviye 1 ya da Seviye 2 sınıfı özel bir şarj cihazıyla yapılmaktadır (Iranpour, Narimani, & Jia, 2025). Böyle bir kullanım örüntüsünün de dağıtım şebekesi için önemli sonuçları ortaya çıkarması yadsınamaz bir gerçekliktir. Bunun temel nedeni, dağıtım şebekelerinin tarihsel olarak abone başına görece düzgün ve öngörülebilir bir yük artışı varsayılarak ve ortak servis transformatörlerinde oldukça cömert eş zamanlılık (diversite) kabulleriyle tasarlanmış olmasıdır.

Tek bir konut tipi elektrikli araç şarj cihazının çektiği sürekli yük, alışılmış ev aletlerine kıyasla oldukça yüksektir. Tepe talebi genellikle 2–5 kW düzeyinde kalan bir haneye Seviye 2 bir şarj cihazı tek başına 3,3–19,2 kW ek yük getirebilmektedir. Bu nitelikteki birden fazla yükün aynı alçak gerilim fiderine ya da direk tipi tek bir servis transformatörüne bağlanması ve akşam saatlerindeki konut tepe yüküyle eş zamanlı çalışması durumunda ortaya çıkabilecek etkiler, literatürde oldukça tutarlı biçimde üç başlık altında ele alınmaktadır (Harish & Surendra, 2022; Nour, Chaves-Ávila, Magdy, & Sánchez-Miralles, 2020; Srivastava, Manas, & Dubey, 2023):

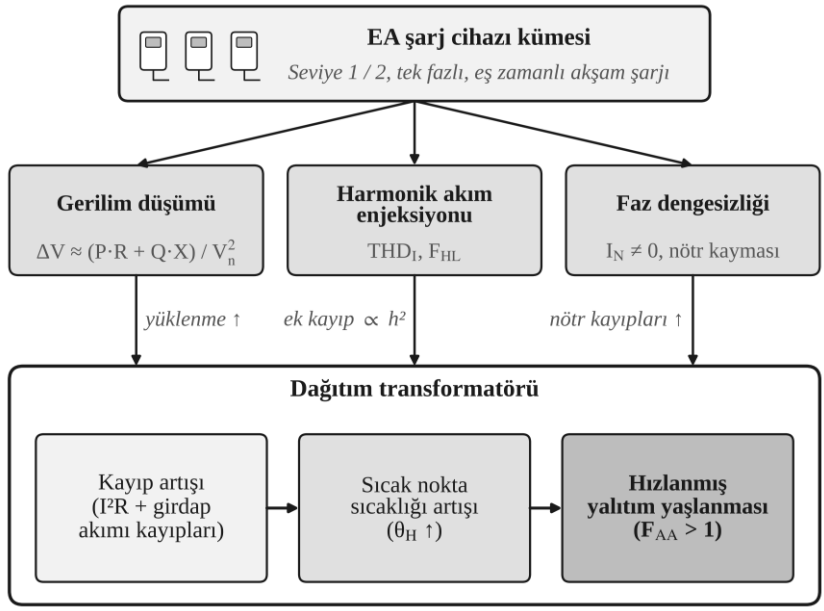
(i) bara gerilimlerini yönetmelikle belirlenen tolerans bantlarının dışına çıkarabilecek büyüklükte kararlı durum gerilim düşümü;

(ii) şarj cihazının güç elektroniği ön katının şebekeye harmonik akım enjekte etmesi; bu durum ekipman kayıplarını artırmakta ve ortak bağlantı noktasında (OBN) akım ve gerilim bozulma sınırlarının aşılmasına yol açabilmektedir;

(iii) artan RMS yüklenme ile harmonik kaynaklı ısınmanın birleşik etkisiyle dağıtım transformatörünün yalıtım ömrünün hızla tükenmesi.

Bu üç etki fiziksel olarak birbirine bağlıdır. Harmonik akımlar, gerilim düşümünü belirleyen temel frekans yüklenmesinden bağımsız olarak transformatör kayıplarını yükseltir; her ikisi de aynı ekipmana, yani dağıtım transformatörüne etki eder. Literatürde EA kaynaklı strese en çok maruz kalan şebeke varlığı olarak defalarca öne çıkan da yine bu transformatördür (Srivastava vd., 2023). Bu bölümde söz konusu etkiler sırasıyla incelenmektedir. Her bir etki için öncelikle ilgili mühendislik modelleri ortaya konulmakta, ardından uygulanabilir standartlar ve nicel bulgular sentezlenmektedir. Son olarak bu etkilerin yönetimine yönelik önerilen azaltım yaklaşımları ele alınmaktadır. Bu

üç etkinin birbiriyle ilişkisi ve dağıtım transformatöründe nasıl birleştiği Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1. Ev tipi EA şarjının dağıtım şebekesindeki üç temel güç kalitesi etkisi ve dağıtım transformatöründe birleşmesi

2. EV TİPİ EA ŞARJININ TEMELLERİ

2.1. Şarj Seviyeleri

Ev tipi şarj ekipmanları genellikle SAE J1772 ve buna karşılık gelen IEC 61851 Mod 2/3 kategorileri çerçevesinde iki seviyede sınıflandırılır. Seviye 1 şarjda standart, tek fazlı 230 V'luk (ABD için 120 V'luk) bir ev prizi kullanılır ve kabaca 1,4 ila 1,9 kW güç sağlanır. Çekilen akım mütevazı olduğu için tek bir cihazın şebekeye etkisi küçüktür; yine de çok sayıda cihaz aynı anda çalıştığında bu etki göz ardı edilemeyecek düzeye gelir. Seviye 2 şarjda ise özel bir 208–240 V'luk (ya da üç fazlı 400 V'luk) devre ve duvara sabitlenmiş veya taşınabilir bir Elektrikli Araç Besleme Ekipmanı (EVSE) birimi kullanılır. Bu durumda aktarılan güç, aracın araç üstü şarj cihazının anma değerine ve devredeki kesicinin boyutuna göre kabaca 3,3 kW ile 19,2 kW arasında değişir. Bugün ev kurulumlarında baskın teknoloji Seviye 2'dir. Bunun nedeni, Seviye 2 şarjın tipik bir günlük işe gidiş-gelişte harcanan enerjiyi bütün bir gece yerine birkaç saat içinde geri doldurabilmesidir. Ev tipi şarj seviyelerine ait temel büyüklükler Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Ev tipi EA şarj seviyelerinin karşılaştırılması

Şarj seviyesi	Besleme(gerilim / faz)	Tipik akım	Tipik güç	Tam dolum süresi*(40 kWh batarya)
Seviye 1				
Mod 2, ev priziTip 1 / Tip 2 araç girişi	230 V, 1F	6–8 A	1,4–1,9 kW	≈ 21–29 saat
Seviye 2 – tek fazlı				
Mod 3, duvar tipi EVSETip 2 (Avrupa) / Tip 1 (K. Amerika)	230 V, 1F	16–32 A	3,7–7,4 kW	≈ 5,4–10,8 saat
Seviye 2 – üç fazlı				
Mod 3, duvar tipi EVSETip 2 (IEC 62196-2)	400 V, 3F	16–32 A	11–22 kW	≈ 1,8–3,6 saat

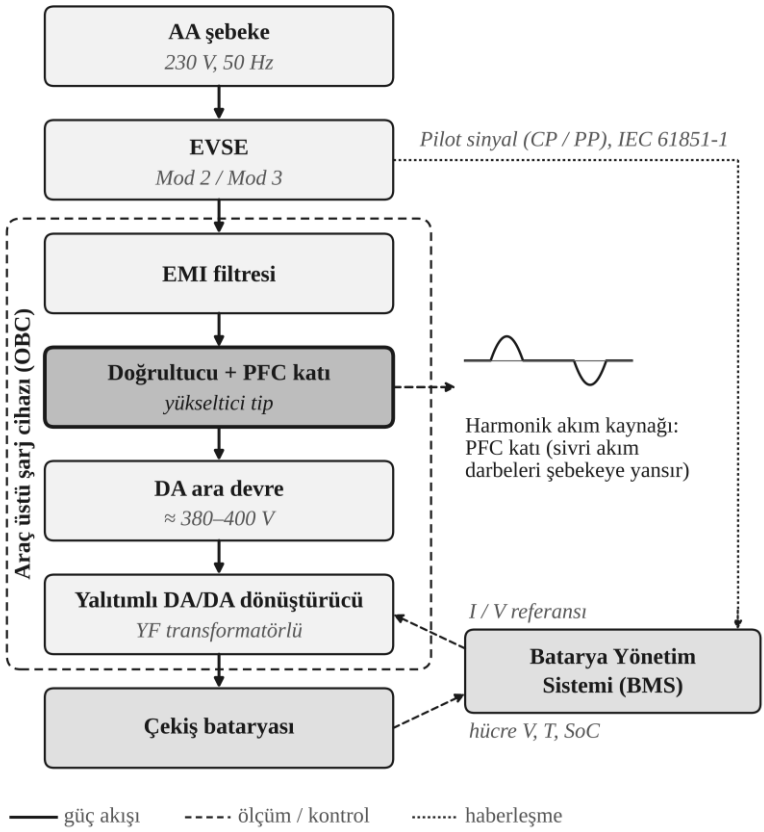
Kaynak: SAE J1772 ve IEC 61851-1 esas alınarak yazar tarafından hazırlanmıştır. * Şarj kayıpları ihmal edilmiş ve şarj gücünün tüm süre boyunca sabit kaldığı kabul edilmiştir.

2.2. Araç Üstü Şarj Cihazı Topolojisi ve Güç Kalitesi Etkilerinin Kaynağı

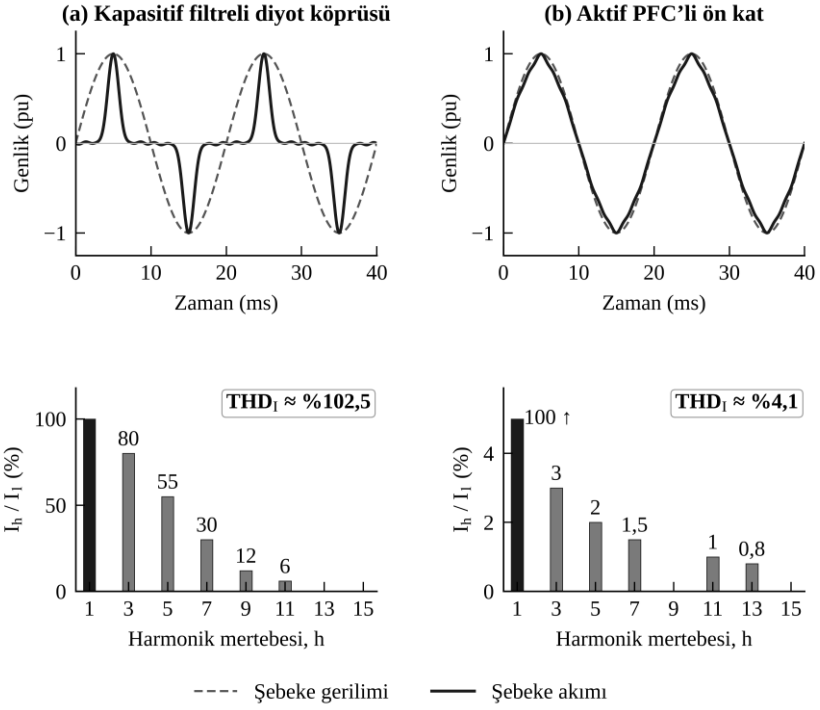
Her iki şarj seviyesinde de şebekeden gelen Alternatif Akımı (AA)'yı çekiş bataryasının ihtiyaç duyduğu Doğru Akıma (DA) dönüştüren birim, aracın araç üstü şarj cihazıdır (On Board Charger-OBC). Geleneksel bir OBC'de önce bir AA/DA ön doğrultucu katı bulunur; modern tasarımlarda bu kat genellikle yükseltici tipte bir güç faktörü düzeltme (Power Factor Correction-PFC) dönüştürücüsüdür. Onu, batarya yönetim sistemine iletilen şarj akımı ve gerilim profilini düzenleyen yalıtımlı bir DA/DA katı izler. Şarj cihazının harmonik imzasından asıl sorumlu olan PFC katıdır. İyi tasarlanmış aktif bir PFC ön katı, birime çok yakın bir temel bileşen (kayma) güç faktörüne ve %5'in altında bir akım Toplam Harmonik Bozulmasına (Total Harmonic Distortion-THD) ulaşarak IEEE 519 sınırlarını rahatlıkla karşılayabilir. Öte yandan eski, ucuz ya da kapasitif filtrelemeli basit diyot köprüsüyle doğrultma yapan Seviye 1 şarj cihazları, düşük mertebeli tek harmoniklerin (3., 5., 7.) baskın olduğu, sivri ve harmonikçe zengin bir akım dalga biçimi çeker (Alame, Azzouz, & Kar, 2020; Gómez & Morcos, 2003). Bu ayrım önem taşımaktadır; zira yayımlanmış çalışmalarda EA şarj cihazları için bildirilen toplam harmonik bozulma (THD) değerleri %5'in altından %25'in üzerine kadar geniş bir aralıkta dağılmaktadır.

Söz konusu dağılım, EA'lara özgü tek ve sabit bir harmonik karakteristikten ziyade şarj cihazı topolojisi ve şarj gücü seviyesindeki farklılıkları yansıtmaktadır (Ibrahim, Gaber, & Zakzouk, 2024; Lucas, Bonavitacola, Kotsakis, & Fulli, 2015).

Tipik bir araç üstü şarj cihazının blok yapısı Şekil 2'de verilmiştir. Pasif diyot köprülü ve aktif PFC'li ön katların şebekeden çektiği akım dalga biçimleri ile bunlara ait harmonik spektrumları ise Şekil 3'te karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Şekil 3'ten görüleceği üzere kapasitif filtreli diyot köprüsü, gerilimin tepe değeri civarında kısa süreli ve sivri akım darbeleri çekerken; aktif PFC katı akımı gerilimle aynı fazda ve sinüse yakın biçimde şekillendirmektedir.



Şekil 2. Ev tipi bir araç üstü şarj cihazının (OBC) blok yapısı



Şekil 3. Kapasitif filtreli diyot köprülü (a) ve aktif PFC'li (b) şarj cihazı ön katlarının şebeke akımı dalga biçimleri ile harmonik spektrumları
Kaynak: Örnek harmonik spektrumları kullanılarak yazar tarafından hazırlanmıştır.

3. GERİLİM DÜŞÜMÜ VE GERİLİM SAPMASI

3.1. Fider Gerilim Düşümü Modeli

Empedansı $(R + jX)$ olan radyal bir alçak gerilim fider kesiminin, aşağı akıştaki bir yüke P aktif gücünü ve Q reaktif gücünü taşıdığı düşünülsün. Bu kesim boyunca oluşan yaklaşık birim değer (pu) gerilim düşümü, iletken empedansı üzerindeki fazör gerilim düşümünün sanal bileşeni ihmal edilerek şu şekilde yazılabilir:

$$\Delta V_{pu} \approx \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{V_n^2} \qquad (1)$$

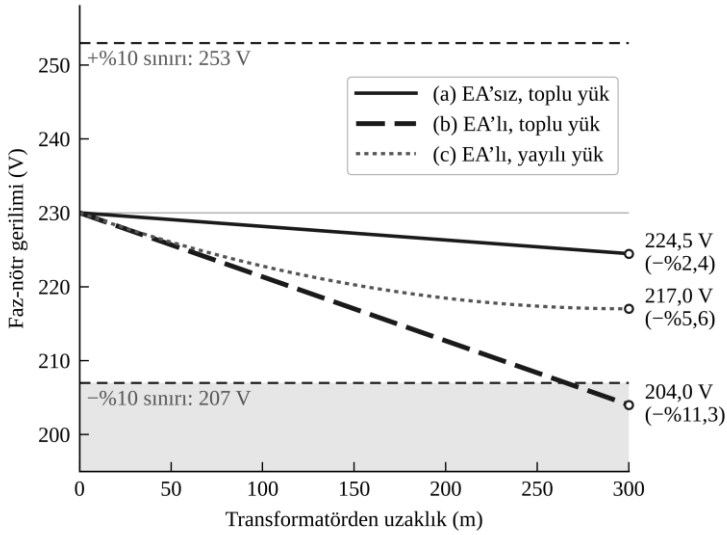
Burada P ve Q yükün üç fazlı toplam aktif ve reaktif güçlerini, V_n ise hat-hat anma gerilimini göstermektedir. Eşitliğin sağ tarafı V_n ile çarpıldığında gerilim düşümü volt cinsinden elde edilir. Dengeli yüklenme varsayımı altında bu ifade, faz-nötr gerilimi üzerindeki yüzde düşümü de verir.

Ev tipi şarj cihazlarının PFC ön katı genellikle birime yakın güç faktöründe çalıştığından, bu cihazların ΔV'ye katkısında P·R terimi baskın gelir. Yani belirli bir şarj yükünün ne kadar gerilim düşümü yaratacağını asıl belirleyen, iletken direnci ve fider uzunluğudur. Bir konut fideri boyunca biriken gerilim düşümü, kaynağa kadar her kesimdeki düşümlerin toplamına eşittir. Bu nedenle dağıtım transformatöründen elektriksel olarak uzakta kalan bir şarj cihazı, kendi bağlantı

noktasındaki gerilim sapmasına orantısız biçimde katkıda bulunur ve aynı branşmanda kendisinden sonra gelen her abonenin gördüğü gerilimi de aşağı çeker.

Bu etkinin büyüklüğünü somutlaştırmak amacıyla, bir dağıtım transformatöründen beslenen 0,4 kV'luk, 300 m uzunluğunda ve 4×50 mm² alüminyum kablolu (R ≈ 0,641 Ω/km) radyal bir alçak gerilim fiderinin ucunda 10 konutun bulunduğu bir senaryo ele alınmıştır. Yüklerin fazlara dengeli dağıldığı ve güç faktörünün bire yakın olduğu kabulüyle, konut başına 2 kW'lık akşam tepe yükünde fider sonundaki gerilim düşümü yalnızca %2,4 düzeyindedir. Aynı konutların her birinde 7,4 kW'lık bir Seviye 2 şarj cihazının eş zamanlı çalışması durumunda ise düşüm yaklaşık beş kat artarak %11,3'e ulaşmakta, fider sonundaki faz-nötr gerilimi 204 V'a inmektedir. Şekil 4'te görüldüğü üzere bu durumda gerilim, transformatörden yaklaşık 266 m uzaklıktan itibaren EN 50160'ın −%10 sınırının altına düşmekte ve fiderin son kesimindeki aboneler tolerans bandının dışında kalmaktadır. Yükün fider boyunca düzgün dağıldığı daha iyimser durumda bile düşüm %5,6 olarak gerçekleşmektedir.

Bu değerler, transformatör sekonder geriliminin anma değerinde olduğu ve şarj cihazlarının fazlara eşit dağıldığı varsayımına dayanmaktadır. Uygulamada akşam saatlerinde sekonder gerilimi zaten anma değerinin altında olabilmekte, tek fazlı şarj cihazlarının aynı faza toplanması durumunda ise ilgili fazdaki düşüm çok daha büyük olmaktadır (bkz. Bölüm 6).

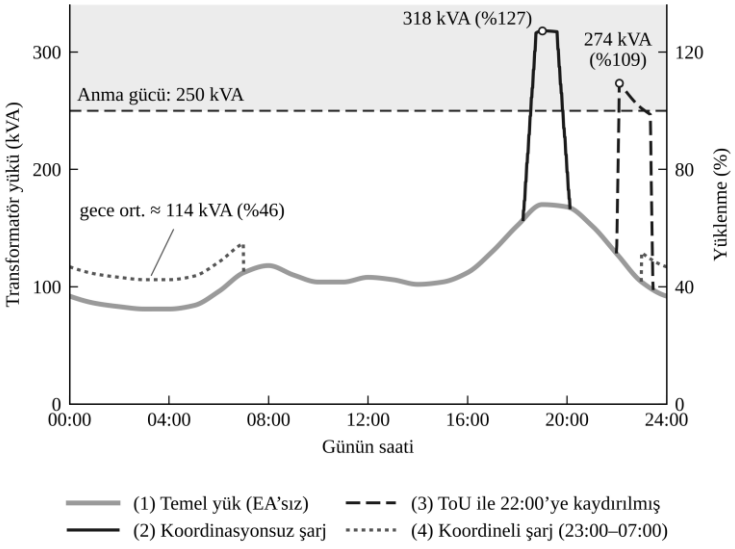


Şekil 4. 300 m'lik radyal alçak gerilim fiderinde, EA şarjı olmadan (a) ve 10 adet 7,4 kW'lık şarj cihazıyla (b, c) gerilim profili
Kaynak: Yazar tarafından hesaplanmıştır.

3.2. Kümelenme ve Çeşitlilik Varsayımlarının Çöküşü

Dağıtım transformatörleri ve sekonder iletkenler, abonelerin tepe taleplerinin aynı anda oluşmadığını varsayan çeşitlilik (ya da eş zamanlılık) faktörleriyle boyutlandırılır. Konut tipi EA şarjı bu varsayımı iki yoldan sarsar. İlki zamansaldır: şarj olayları akşam eve dönüş saatlerinde yoğunlaşır ve puant dışındaki bir çukuru doldurmak yerine mevcut konut tepesiyle çakışır (Rassaei, Soh, & Chua, 2015). İkincisi mekânsaldır: EA sahipliği hane geliri ve konut tipiyle ilişkili olduğundan, araçlar şebekeye eşit dağılmaz; belirli fiderlerde ya da belirli transformatörlerin hizmet alanlarında toplanma eğilimi gösterir (Harish & Surendra, 2022; Iranpour vd., 2025; Srivastava vd., 2023). Gerçek ya da sentetik konut devrelerinde artan EA penetrasyonunu modelleyen çalışmalar, orta düzeydeki penetrasyonun bile kayda değer bir gerilim sapması yaratmaya yettiğini bildirmektedir. Sıkça atıf yapılan bir analize göre koordinasyonsuz şarj altında dağıtım transformatörünün aşırı yüklenmesi, bağlı abonelerin yalnızca %10'u gibi düşük bir penetrasyon düzeyinde başlayabilmektedir (Srivastava vd., 2023). Daha yakın tarihli transformatör düzeyindeki testlerde ise geleneksel 200 kVA'lık bir birimde tam EA yüklenmesi altında sekonder gerilimin anma değerinin kabaca %93'üne kadar düştüğü kaydedilmiştir; bu değer tipik yasal toleransın sınırında, hatta ötesindedir (Azeem, Zidan, & Zahid, 2026).

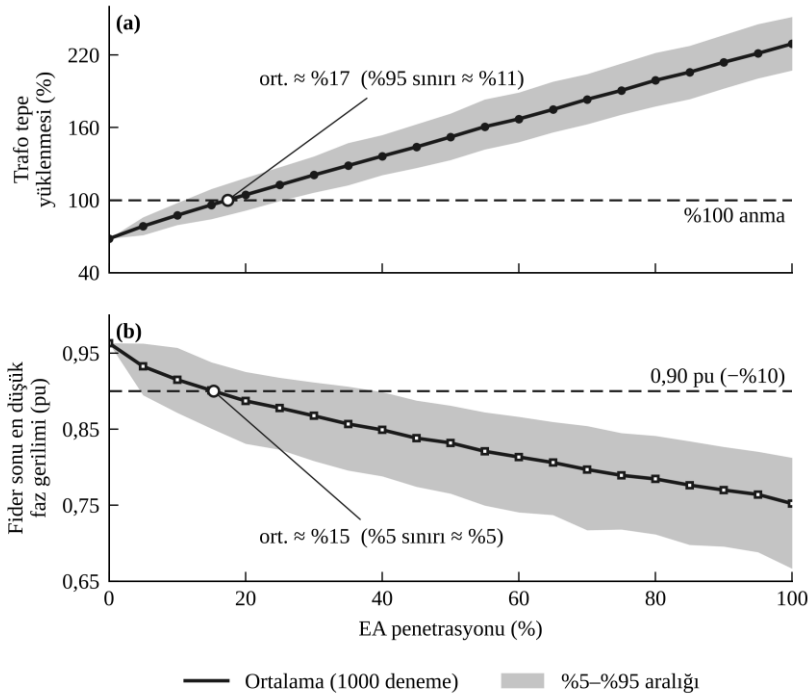
Zamansal çakışmanın etkisi Şekil 5'te tipik bir konut fiderinin günlük yük eğrisi üzerinde gösterilmiştir. Şekilde koordinasyonsuz şarjın akşam tepesini nasıl yükselttiği ile Bölüm 7'de ele alınan zaman dilimli tarife ve koordineli şarj senaryoları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5. Bir konut fiderinde 24 saatlik yük eğrisi: EA'sız temel yük, koordinasyonsuz şarj, zaman dilimli tarife (ToU) ile kaydırılmış şarj ve koordineli (akıllı) şarj
Kaynak: Yazar tarafından hesaplanmıştır.

Transformatör düzeyindeki etkiyi değerlendirmek için, 120 konutu besleyen 250 kVA'lık bir dağıtım transformatörü ele alınmıştır. Abonelerin eş zamanlılığı da hesaba katıldığında akşam tepe saatindeki toplam konut yükü 170 kVA olup transformatörde yaklaşık 80 kVA'lık bir kapasite payı kalmaktadır. Tüm EA'ların akşam tepesinde aynı anda şarja başladığı en kötü durumda bu pay, yalnızca 10 adet 7,4 kW'lık şarj cihazıyla dolmaktadır. Bu da abonelerin yaklaşık %8'ine EA girmesinin transformatörü anma gücüne ulaştırmaya yettiği anlamına gelmektedir. Bu sonuç, Srivastava vd. (2023) tarafından bildirilen %10 düzeyindeki aşırı yüklenme eşiğiyle uyumludur. Akşam tepesinde araçların ancak yarısının aynı anda şarj olduğu kabul edilirse (eş zamanlılık katsayısı 0,5) eşik yaklaşık %17,5'e yükselir. Buna karşılık 11 kW'lık üç fazlı şarj cihazlarının kullanılması durumunda eşik %6'nın altına düşer. Görüldüğü gibi sonuç, şarj gücüne ve eş zamanlılık varsayımına son derece duyarlıdır. Aynı 20 aracın eve dönüşte koordinasyonsuz biçimde şarja başlaması durumunda transformatör yükünün 318 kVA'ya (%127) çıktığı Şekil 5'te görülmektedir.

Bu deterministik yaklaşım, gerçekte rastgele olan şarj başlangıç zamanlarını ve araçların şebekedeki konumlarını yansıtmamaktadır. Bu nedenle aynı şebeke için, şarj başlangıç saatleri, günlük enerji ihtiyaçları ve tek fazlı şarj cihazlarının bağlı olduğu fazlar rastgele seçilerek her penetrasyon düzeyinde 1000 denemelik bir Monte Carlo analizi yapılmıştır (Şekil 6). Analize göre transformatör, ortalama olarak yaklaşık %17 penetrasyonda anma gücüne ulaşmaktadır. Bu değer 0,5 eş zamanlılık kabulüyle bulunan sonuca oldukça yakındır ve söz konusu kabulün gerçekçi olduğunu göstermektedir. Ancak olumsuz senaryolarda (%95 olasılık sınırı) bu eşik %11'e kadar inmektedir. Dikkat çekici bir diğer bulgu, fider sonundaki gerilimin transformatör sınırından daha önce, ortalama %15 penetrasyonda 0,90 pu'nun altına inmesidir. Başka bir deyişle, tek fazlı şarj cihazlarının fazlar arasında dengesiz dağılması nedeniyle bu şebekede bağlayıcı kısıt, transformatörün ısıl kapasitesinden önce gerilim sınırı olmaktadır.



Şekil 6. 250 kVA'lık transformatör ve 300 m'lik fiderden oluşan şebekede EA penetrasyonuna bağlı olarak (a) transformatör tepe yüklenmesi ve (b) fider sonundaki en düşük faz gerilimi (1000 Monte Carlo denemesinin ortalaması ve %5–%95 aralığı)
Kaynak: Yazar tarafından yapılan Monte Carlo benzetimi (her penetrasyon düzeyinde 1000 deneme).

3.3. Gerilim Kalitesine İlişkin Standartlar

Şebeke gerilim toleransı bölgesel standartlarla düzenlenir. Kuzey Amerika'da ANSI C84.1, normal işletme koşullarında anma servis geriliminin yaklaşık ±%5'i kadar bir A Aralığı toleransı tanımlar. Avrupa'da geçerli olan EN 50160 ise alçak gerilimde besleme geriliminin, bir haftalık ölçüm süresinin %95'i boyunca anma değerinin ±%10'u içinde kalmasını öngörür. EA kaynaklı kalıcı gerilim düşümünün bu bantlara yaklaşması ya da onları aşması, literatürde (harmonik sorunlardan ayrı olarak) dile getirilen başlıca kararlı durum güç kalitesi kaygısıdır. Işıkların sönükleşmesi, ev aletlerinin düzgün çalışmaması ya da hassas elektronik yüklerin düşük gerilim nedeniyle devre dışı kalması, abonenin doğrudan fark ettiği ve bu ölçütle en yakından bağlantılı belirtilerdir. Türkiye'de EN 50160 standardı TS EN 50160 olarak yürürlüktedir. Dağıtım şebekesindeki gerilim kalitesine ilişkin uygulama esasları ise Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından belirlenmektedir. Bu esaslara göre etkin gerilim değeri, toplam harmonik bozulma ve kırpışma gibi parametrelerin uygunluğu TS EN 50160'ta tanımlanan sınır değerler esas alınarak değerlendirilir. Harmonik bozulma açısından ise IEEE 519 standardındaki sınırlar da dikkate alınmaktadır. Bu nedenle Bölüm 4.3'te ele alınan IEEE 519 sınırları, Türkiye'deki uygulama açısından da doğrudan önem taşımaktadır. Bu bölümde ve Bölüm 4.3'te incelenen

gerilim ve harmonik standartlarına ait başlıca sınırlar Tablo 2'de toplu olarak verilmiştir.

Tablo 2. EA şarjı açısından ilgili başlıca gerilim ve harmonik standartları ile sınır değerleri

Standart	Kapsam / uygulandığı nokta	Büyüklük	Sınır değer
Kararlı durum gerilim büyüklüğü			
ANSI C84.1	Kuzey Amerika, servis (abone bağlantı) gerilimi	Kararlı durum RMS gerilim	A Aralığı: anma değerinin±%5'i
EN 50160 (TS EN 50160)	Avrupa / Türkiye, AG besleme gerilimi	10 dk ortalama RMS gerilim	Haftanın %95'inde ±%10Tüm değerler: +%10 / −%15
Gerilim harmonikleri			
EN 50160	AG besleme gerilimi	THD_V (40. harmoniğe kadar)	≤ %8 (bir haftanın %95'inde)
IEEE 519-2014	Ortak bağlantı noktası (OBN)	THD_V (tek harmonik)	≤ 1 kV: %8 (tek: %5)1–69 kV: %5 (tek: %3)
IEC 61000-2-2	AG kamu şebekesi (uyumluluk düzeyi)	THD_V	%8
Akım harmonikleri			
IEEE 519-2014	OBN,120 V–69 kV	Toplam talep bozulması (TDD)	I_{SC}/I_L < 20: %520–50: %8; 50–100: %12100–1000: %15; > 1000: %20
IEC 61000-3-2	Faz başına ≤ 16 A cihaz (ör. Seviye 1 ve 3,7 kW şarj)	Harmonik akım emisyonu (Sınıf A)	Mutlak sınırlar, ör.$I_3 \leq 2{,}30$ A; $I_5 \leq 1{,}14$ A;$I_7 \leq 0{,}77$ A
IEC 61000-3-12	Faz başına 16–75 A cihaz (ör. 7,4–22 kW şarj)	Harmonik akım emisyonu (I_{ref}'e göre %)	R_{sce}'ye bağlı; ör. $R_{sce} = 33$, tek fazlı cihaz: $I_3 \leq$ %21,6; THC ≤ %23

Kaynak: ANSI C84.1; EN 50160; IEEE 519-2014; IEC 61000-2-2, IEC 61000-3-2 ve IEC 61000-3-12; Alawasa (2026); Blooming ve Carnovale (2006).

4. HARMONİK BOZULMA

4.1. Kaynaklar ve Özellikler

Bölüm 2.2'de değinildiği gibi, ev tipi şarj cihazlarının şebekeye verdiği harmonik akımlar OBC'nin doğrultucu katından kaynaklanır. Saha ve laboratuvar ölçümleri, şarj cihazının tasarımına ve yüklenme noktasına bağlı olarak epey geniş bir akım THD aralığı ortaya koymaktadır. Yakın tarihli bir ölçüm kampanyasında, test edilen EA modellerinde normal şarj sırasında THD_I değerinin %1,5 ile %10,7 arasında değiştiği görülmüştür (Alawasa, 2026). Alawasa'nın (2026) aktardığı, tek fazlı ve üç fazlı Seviye 2/3 donanım üzerinde yapılan başka bir çalışmada ise belirli işletme koşullarında akım THD'si sırasıyla %19,2'ye ve %17,3'e kadar çıktığı gözlenmiştir. Burada gözden kaçmaması gereken bir nokta, toplam akım bozulması standart sınırlara uysa bile, tek tek yüksek mertebeli harmoniklerin, çoğunlukla 11. ve 13. harmoniğin, IEEE 519'daki harmonik başına sınırları aşabildiğidir. Bu durum toplam talep bozulması (TDD) sınırı aşılmadığı hâlde gerçekleşmiştir (Lucas vd., 2015). Literatürde farklı şarj cihazı tipleri ve güç seviyeleri için bildirilen ölçüm sonuçları Tablo 3'te özetlenmiştir.

Tablo 3. Literatürde EA şarj cihazları için bildirilen akım harmonik bozulması ve güç faktörü değerleri

Kaynak	Araç / şarj tipi, güç	Ön kat	THD_I (%)	Güç faktörü	Baskın harmonikler / not
Alawasa (2026) Ölçüm; 230 V, tek fazlı AA şarj (hızlı / yavaş mod)	BYD Song Plus6,2 / 3,4 kW	Tek fazlı OBC (aktif PFC)	3,9 / 6,3	0,989–0,999	5. (%2,2) ve 3.; yavaşta 5. ve 9. (%3,7)
	VW ID.65,2 / 3,4 kW		2,5 / 1,6		3. (%1,9); 13. harmonikte IEC 61000-3-2 sınırı aşılıyor
	Neta U5,1 / 3,6 kW		9,2–10,2		5. (≈ %8) baskın
	Nissan LEAF (2016)5,1 / 2,7 kW		3,7 / **10,7**		Yavaşta 3. (%7,5) ve 5. (%7,1); IEC 61000-3-2 sınırlarını aşıyor
	Tesla Model 311,1 / 7,4 kW		4,2 / 6,7		3. ve 7. (yavaşta %3,9 ve %3,4)

Kaynak	Araç / şarj tipi, güç	Ön kat	THD_I (%)	Güç faktörü	Baskın harmonikler / not
Alawasa (2026)	Tek fazlı 4–20 kW;üç fazlı DA hızlı 20–50 kW	—	≤ 19,2 (1F)≤ 17,3 (3F)	—	Belirli işletme koşullarında ölçülen en yüksek değerler
Lucas vd. (2015) Ölçüm + benzetim	DA hızlı şarj, 18,7 kWh bataryalı araç; ≈ 18–24 kW	Üç fazlı hızlı şarj istasyonu	TDD sınır içinde	—	11. ve 13. harmonikler tek harmonik sınırlarını aşıyor; çok araçta harmonik sınırı güç kapasitesinden önce bağlayıcı
Alame vd. (2020) Benzetim	Seviye 1/2 (1F) ve Seviye 3	—	SoC ile artıyor	—	Tepe F_{AA}: 8,6 (S1/2), 18,7 (S3); trafo ömrü 20,55 → 17,88 / 16,40 yıl
Gómez ve Morcos (2003) Analitik	Batarya şarj cihazları (doğrudan bağla-şarj et)	Diyot köprülü	Önerilen üst sınır: 25–30	—	Trafo ömür kaybı THD_I ile karesel ilişkili

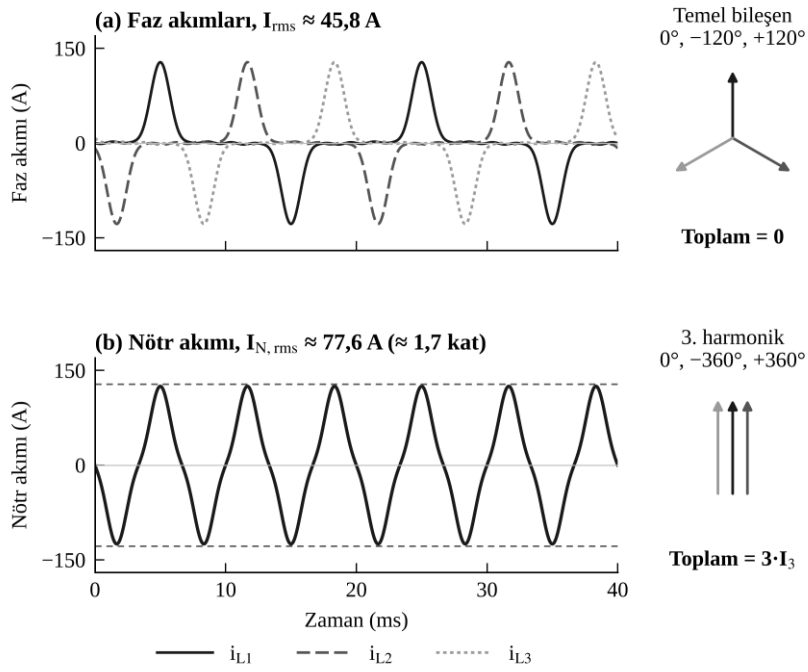
Kaynak: Alawasa (2026); Lucas vd. (2015); Alame vd. (2020); Gómez ve Morcos (2003). Alawasa (2026) satırlarında değerler hızlı / yavaş şarj modu için verilmiştir.

4.2. Yayılım, Üçlü Harmonikler ve Nötr Yüklenmesi

Tek fazlı konut devrelerinde, ortak bir üç fazlı servis transformatörünün farklı fazlarına bağlı birden fazla şarj cihazının çektiği tek mertebeli harmonik akımlar transformatörde kısmen birbirini götürebilir. Ne var ki doğrusal olmayan tek fazlı yüklerin ürettiği üçlü harmonikler (3., 9., 15., …) böyle davranmaz. Dört telli bir sistemin nötr iletkeninde bu harmonikler birbirini yok etmek yerine toplanır ve yoğun, eş zamanlı şarj altında nötr akımını faz akımının üzerine taşıyabilir. Bu mekanizma, genel olarak doğrusal olmayan tek fazlı yükler için uzun zamandır bilinmekte ve ortak bir sekondere bağlı ev tipi EA şarj cihazı kümelerine de doğrudan uygulanabilmektedir (Srivastava vd., 2023). Ayrıca IEEE 519'daki harmonik akım sınırları, ortak bağlantı noktasındaki mevcut kısa devre akımının yük akımına oranıyla ölçeklenir. Dolayısıyla aynı fidere daha fazla şarj cihazı eklemek, bir yandan şebekeye verilen harmonik akımı artırırken öte yandan izin verilen sınırı daraltır. Sonuçta harmonik kısıt, ekipmanın ısıl (kVA) anma değerine ulaşılmadan önce bağlayıcı hâle gelebilir (Lucas vd., 2015).

Üçün katı harmoniklerin nötr iletkenindeki etkisini somutlaştırmak için, dört telli bir alçak gerilim sekonderinin her fazına temel bileşen akımı 32 A olan birer tek fazlı şarj cihazının bağlandığı dengeli bir durum ele alınmıştır. Bu durumda faz akımlarının temel bileşenleri nötrde birbirini yok eder. Buna karşılık üçün katı

harmonikler üç fazda aynı fazda olduğundan nötrde aritmetik olarak toplanır. Tablo 4'te verilen spektrumlar kullanıldığında aktif PFC'li şarj cihazlarında nötr akımı yaklaşık 2,9 A olup faz akımının yalnızca %9'u düzeyinde kalmaktadır. Orta kaliteli şarj cihazlarında bu oran %44'e çıkmaktadır. Kapasitif filtreli diyot köprülü şarj cihazlarında ise nötr akımı 77,7 A'e ulaşmakta ve 45,8 A olan faz akımının yaklaşık 1,7 katına çıkmaktadır. Şekil 7'de görüldüğü üzere bu durumda nötr akımının tepe değeri faz akımınınkini aşmamaktadır. Ancak faz akımı yalnızca kısa darbeler hâlinde akarken nötr akımı neredeyse sürekli aktığından, ısınmayı belirleyen RMS değer çok daha yüksektir. Nötr kesitinin faz kesitine eşit ya da daha küçük seçildiği eski tesislerde bu durum nötr iletkeninin aşırı ısınmasına yol açabilir. Dolayısıyla fazlar mükemmel dengede olsa bile nötr iletkeni, yoğun tek fazlı şarj altında sistemin en zayıf halkası hâline gelebilmektedir.



Şekil 7. Üç fazlı dört telli sistemde her fazına bir diyot köprülü şarj cihazı bağlı dengeli yüklenmede (a) faz akımları ve (b) nötr akımı; sağda temel bileşen ve 3. harmonik fazörleri
Kaynak: Yazar tarafından hesaplanmıştır.

4.3. Standartlar: IEEE 519 ve IEC 61000

IEEE 519 (2014 revizyonu), ortak bağlantı noktasındaki gerilim bozulmasını 1 kV ve altındaki sistemler için %8 toplam harmonik bozulma (THD_V) ve harmonik başına %5 ile; 1 kV ile 69 kV arasındaki sistemler için ise sırasıyla %5 ve %3 ile sınırlar. Akım bozulması sınırlarını ise toplam talep bozulması (TDD) cinsinden tanımlar; bu sınırlar, kısa devre akımının yük akımına oranına (I_{SC}/I_L) bağlı olarak maksimum talep yük akımının %5'i ile %20'si arasında değişir (Alawasa, 2026; Blooming & Carnovale, 2006; Hoevenaars, LeDoux, & Colosino, 2003). IEC uygulamasını izleyen pazarlarda IEC 61000 serisi kabaca eşdeğer ilkelere dayanır. Bu serideki IEC 61000-2-2, 1 kV'un altındaki alçak gerilim şebekeleri için %8'lik bir toplam gerilim harmonik bozulma sınırı ile harmonik başına sınırlar belirler (Alawasa, 2026). Unutulmaması gereken nokta, bu sınırların tek bir cihaza değil, dağıtım şirketi ile abone arasındaki ortak bağlantı noktasına uygulanmasıdır. Çok sayıda küçük ev tipi şarj cihazının etkisini, birimleri tek tek değerlendirmek yerine toplu olarak ele almak gerektiğinde belirleyici olan da tam olarak bu ayrımdır. Söz konusu sınırlar Tablo 2'de toplu olarak verilmiştir.

4.4. Ampirik Bulguların Sentezi

Ölçüm literatürüne bir bütün olarak bakıldığında, şebeke planlaması açısından üç sonuç öne çıkmaktadır. Birincisi, aktif PFC ön katlı modern Seviye 2 ev tipi şarj cihazları tek başlarına THD bakımından iyi davranır ve anma koşullarında genellikle IEEE 519 ile IEC 61000 sınırlarına uyar. İkincisi, cihazların tek tek sınırlara uyması, birkaçı aynı anda çalışmaya başladığında fider ya da transformatör düzeyinde de uyumun sağlanacağını garanti etmez. Çünkü ortak bağlantı noktasında akım bozulması toplanarak büyürken, çekilen yük akımı arttıkça izin verilen TDD sınırı daralır (Cao, Wang, & Chen, 2016). Üçüncüsü, eski ya da düşük maliyetli Seviye 1 ekipmanlar ile bazı hızlı şarj teknolojileri harmonik bakımından belirgin şekilde daha zengindir. Karma bir konut nüfusunda bunların varlığı, düşük penetrasyonda bile toplam bozulma tablosuna hâkim olabilir (Alame vd., 2020; Ibrahim vd., 2024).

5. TRANSFORMATÖR YÜKLENMESİ VE ISIL YAŞLANMA

5.1. Ömür Kaybı Modellemesi

Dağıtım transformatörlerinde yalıtım ömrü geleneksel olarak, IEEE C57.91'de formüle edilen Arrhenius tabanlı yaşlanma ilişkisiyle modellenir. Bu ilişkide birim değer yaşlanma hızlanma faktörü F_{AA}, sargı sıcak nokta sıcaklığı θ_H'nin (°C cinsinden) üstel bir fonksiyonudur:

$$F_{AA} = \exp\left(\frac{15000}{383} - \frac{15000}{\theta_H + 273}\right) \qquad (2)$$

110 °C'lik anma sıcak nokta sıcaklığında sürekli çalışan bir transformatör, tasarım hızında yaşlanır ($F_{AA} = 1$). Bu sıcaklığın üzerine çıkıldığında, nedeni ister kalıcı aşırı yük, ister harmoniklerin yol açtığı girdap akımı ısınması, isterse ikisi birden olsun, yaşlanma üstel olarak hızlanır. Sıcaklığın altında kalmak ise beklenen yalıtım ömrünü uzatır. F_{AA} sıcaklığın üstel bir fonksiyonu olduğundan,

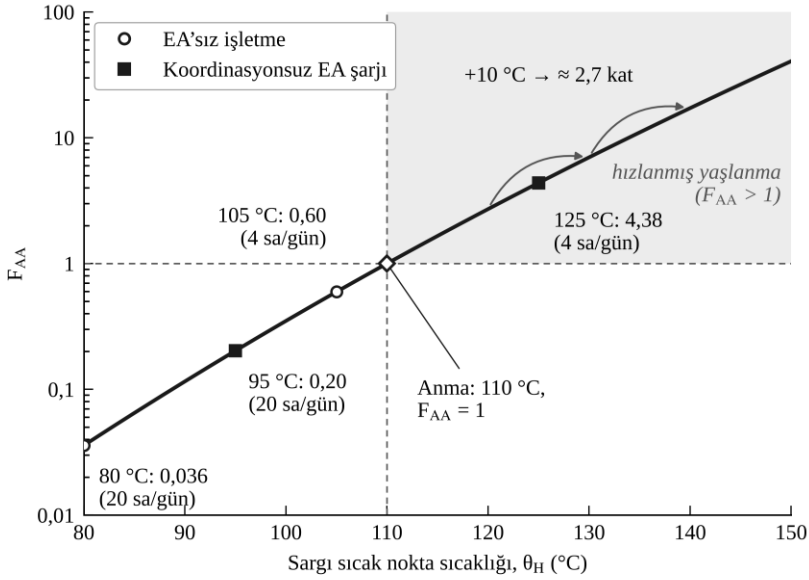
sıcak nokta sıcaklığındaki görece küçük artışlar beklenen transformatör ömründe orantısız ölçüde büyük kısalmalara dönüşür. Literatürde basit bir ısıl anma değeri karşılaştırması yerine ömür kaybı modellemesinin standart analitik yaklaşım olarak kabul edilmesinin nedeni de budur.

Sıcak nokta sıcaklığının gün içinde değiştiği gerçek işletme koşullarında, IEEE C57.91'de tanımlanan eşdeğer yaşlanma faktörü kullanılır:

$$F_{\mathrm{EQA}} = \frac{\sum_{n=1}^{N} F_{\mathrm{AA,n}} \Delta t_n}{\sum_{n=1}^{N} \Delta t_n} \qquad (3)$$

Burada $F_{AA,n}$, Δt_n süreli n. zaman aralığındaki yaşlanma hızlanma faktörü; N ise toplam aralık sayısıdır. Günlük ömür kaybı (saat) $F_{EQA} \times 24$ ile bulunur. IEEE C57.91'e göre 110 °C'de sürekli çalışmada normal yalıtım ömrü 180 000 saat olarak alınmaktadır.

EA şarjının transformatör ömrü üzerindeki etkisini somutlaştırmak için iki günlük işletme profili karşılaştırılmıştır. EA'sız durumda transformatörün günün 20 saatinde 80 °C, akşam tepesindeki 4 saatte ise 105 °C sıcak nokta sıcaklığında çalıştığı kabul edilmiştir. Koordinasyonsuz EA şarjının bulunduğu durumda bu sıcaklıklar sırasıyla 95 °C ve 125 °C olarak alınmıştır. EA'sız durumda her iki çalışma noktası da anma sıcaklığının altında kaldığından eşdeğer yaşlanma faktörü yalnızca 0,13 olup günlük ömür kaybı yaklaşık 3 saattir. EA şarjıyla birlikte eşdeğer yaşlanma faktörü 0,90'a, günlük ömür kaybı ise yaklaşık 22 saate yükselmektedir. Bu da transformatörün ömür tüketiminin yaklaşık 7 kat arttığını göstermektedir. Daha dikkat çekici olan, toplam ömür kaybının yaklaşık %81'inin yalnızca 4 saatlik akşam şarj penceresinde gerçekleşmesidir. Bunun nedeni F_{AA}'nın sıcaklıkla üstel olarak değişmesidir. Şekil 8'de görüldüğü üzere sıcak nokta sıcaklığındaki her 10 °C'lik artış yaşlanmayı yaklaşık 2,7 kat hızlandırmakta, 125 °C'lik çalışma noktası ise tasarım hızının 4 katından fazla bir yaşlanmaya karşılık gelmektedir. Bu sonuç, Bölüm 7'de ele alınan ve şarjı akşam tepesinin dışına kaydıran yaklaşımların transformatör ömrü açısından neden bu kadar etkili olduğunu da açıklamaktadır.



Şekil 8. Yaşlanma hızlanma faktörü F_{AA}'nın sargı sıcak nokta sıcaklığı θ_H ile değişimi (IEEE C57.91) ve EA'sız ile koordinasyonsuz EA şarjlı işletmeye ait çalışma noktaları
Kaynak: IEEE C57.91 bağıntısı kullanılarak yazar tarafından hazırlanmıştır.

5.2. Harmonik Kayıp Faktörü ve K-Faktörü

Harmonik akımlar, transformatör kayıplarını yalnızca temel frekans RMS akımına bakarak beklenecek düzeyin ötesine taşır. Bunun nedeni, sargılardaki, çekirdekteki ve yapısal çelikteki girdap akımı kayıplarının harmonik frekansının yaklaşık olarak karesiyle artmasıdır. Bu etki harmonik kayıp faktörüyle ifade edilir:

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2 \cdot h^2}{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2} \qquad (4)$$

Burada I_h, h mertebesindeki harmonik akımın RMS değeridir. Transformatör üreticilerinin kullandığı K-faktörü anma değeri de aynı ilkeye dayanır ve transformatörün sargı girdap akımı kaybı kapasitesinin belirli bir harmonik akım spektrumuna dayanabilmesi için ne ölçüde düşürüldüğünü ya da yükseltildiğini belirtir. F_{HL} yüksek mertebeli harmonikleri frekansın karesiyle ağırlıklandırdığı için, yüksek mertebeli bileşenlerin baskın olduğu orta düzeyde bir akım THD'si bile, yalnızca THD yüzdesinden tahmin edilenin çok üzerinde bir kayıp artışına ve dolayısıyla sıcak nokta sıcaklığında bir yükselmeye yol açabilir. Transformatör yaşlanması literatüründe Seviye 3 ile ilişkili harmonik içeriğin orantısız etkisine dikkat çekilmesinin fiziksel temeli de budur (Alame vd., 2020).

IEEE C57.110'a göre harmonik içerikli bir yük akımı altında transformatörün taşıyabileceği en büyük akım, anma koşulundaki girdap akımı kayıp oranı $P_{EC\text{-}R}$ kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$I_{\text{maks}}(\text{pu}) = \sqrt{\frac{P_{\text{LL-R}}(\text{pu})}{1+F_{\text{HL}} \cdot P_{\text{EC-R}}(\text{pu})}} \quad (5)$$

Burada $P_{LL\text{-}R}(pu) = 1 + P_{EC\text{-}R}(pu)$, anma koşullarındaki yük kaybının I^2R kaybına oranıdır.

Harmonik içeriğin transformatör kapasitesine etkisini nicel olarak göstermek için, anma girdap akımı kayıp oranı $P_{EC\text{-}R}$ = 0,10 pu olan bir dağıtım transformatörü ve üç tipik şarj cihazı akım spektrumu ele alınmıştır. Spektrumlar sırasıyla aktif PFC'li modern bir Seviye 2 şarj cihazını (A), orta kaliteli bir şarj cihazını (B) ve kapasitif filtreli diyot köprülü bir şarj cihazını (C) temsil etmektedir. Spektrumlar ve bunlara karşılık gelen sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir. Hesaplamalar, transformatörün yalnızca ilgili spektruma sahip yükleri beslediği varsayımıyla yapılmıştır. Aktif PFC'li şarj cihazlarında akım THD'si %4,1, F_{HL} ise 1,05 düzeyindedir. Bu durumda transformatör anma akımına neredeyse tamamen yüklenebilmektedir. Orta kaliteli şarj cihazlarında THD %18'e çıkarken F_{HL} yalnızca %53 artarak 1,61'e ulaşmakta ve izin verilen en büyük akım anma değerinin %97'sine inmektedir. Diyot köprülü şarj cihazlarında ise F_{HL} yaklaşık 10'a çıkmakta ve transformatör anma akımının ancak %74'ü ile yüklenebilmektedir. Aynı temel bileşen akımında yük kaybı sinüsoidal duruma göre yaklaşık 3,7 katına ulaşmaktadır. Bu sonuçlar, THD yüzdesinin tek başına transformatör üzerindeki ısıl etkiyi göstermekte yetersiz kaldığını ortaya koymaktadır. Bunun nedeni F_{HL}'nin harmonikleri mertebelerinin karesiyle ağırlıklandırmasıdır. Transformatör üreticilerinin kullandığı K-faktörü de aynı tanıma dayandığından sayısal olarak F_{HL}'ye eşittir.

Tablo 4. Üç tipik şarj cihazı akım spektrumu için harmonik kayıp faktörü ve transformatör kapasite düşümü

	A Aktif PFC'limodern Seviye 2	**B** Orta kaliteşarj cihazı	**C** Kapasitif filtrelidiyot köprüsü
Akım harmonik spektrumu (I_h / I_1, %)			
I_3	3	15	80
I_5	2	8	55
I_7	1,5	5	30
I_9	—	—	12
I_{11}	1	3	6
I_{13}	0,8	2	—
Transformatör üzerindeki etki ($P_{EC\text{-}R}$ = 0,10 pu)			

	A Aktif PFC'limodern Seviye 2	**B** Orta kaliteşarj cihazı	**C** Kapasitif filtrelidiyot köprüsü
THD_I (%)	4,1	18,1	102,5
I_{rms} / I_1	1,001	1,016	1,432
F_{HL} (= K-faktörü)	1,05	1,61	9,92
Yük kaybı artışı*	+%0,6	+%9,0	+%271
En büyük izin verilen akım,I_{maks} (pu)	**0,998**	**0,973**	**0,743**

Kaynak: IEEE C57.110 esas alınarak yazar tarafından hesaplanmıştır. * Aynı temel bileşen akımında, sinüsoidal yüklenmeye göre transformatör yük kaybındaki artış.

5.3. Hızlanmış Yaşlanmaya İlişkin Ampirik Kanıtlar

Bu etkiyi doğrudan sayılarla ortaya koyan birden fazla çalışma bulunmaktadır. Sıkça atıf yapılan bir analizde, EA'larla etkileşim hâlindeki bir dağıtım transformatörü modellenmiş ve akşam şarj saatlerinde yaşlanma hızlanma faktörünün 1'i aştığı görülmüştür. Aynı çalışmaya göre gerçekçi EA şarj yükleri ve bunlara eşlik eden harmonikler hesaba katıldığında ortalama transformatör ömrünün yaklaşık 20,6 yıllık tasarım değerinden kabaca 16–18 yıla indiği gözlenmiştir. Seviye 3 (hızlı) şarjın ömür kaybına etkisi ise Seviye 1 ya da Seviye 2 şarja göre çok daha büyüktür (Alame vd., 2020). Daha eski ve alanda temel kabul edilen bir çalışma, transformatör ömür tüketimi ile bağlanan batarya şarj cihazının akım THD'si arasında karesel bir ilişki kurmuştur. Aynı çalışma, doğrudan bağla-şarj et koşullarında ömür beklentisindeki azalmayı kabul edilebilir bir aralıkta tutmak için şarj cihazı akım THD'sinin kabaca %25–30 ile sınırlandırılmasını önerir (Gómez & Morcos, 2003). Daha yakın tarihli, transformatör düzeyinde yapılan performans testlerinde ise geleneksel tane yönlendirilmiş çelik çekirdekli birimler, konut tipi EA yüklenmesi altında amorf çekirdekli transformatörlerle karşılaştırılmıştır. Eşdeğer yüklenmede amorf çekirdekli tasarımların yaklaşık %18,6 daha düşük yük kaybı ve kabaca %25 daha düşük yağ sıcaklığı artışı gösterdiği bulunmuştur. Bu sonuç, EA kaynaklı transformatör stresini yönetmeye çalışan dağıtım şirketleri için çekirdek malzemesi seçiminin başlı başına anlamlı bir araç olduğunu göstermektedir (Azeem vd., 2026). Isıl yaşlanmayı tek başına ele almanın ötesine geçen, daha geniş sistem düzeyindeki bir analiz de konut devrelerinde yüksek (yaklaşık %60) EA penetrasyonunda, EA'sız bir referans duruma kıyasla dağıtım altyapısı

güçlendirme maliyetlerinin %19, şebeke enerji kayıplarının ise %40 mertebesinde artabileceğini öngörmüştür (Srivastava vd., 2023).

6. GERİLİM VE AKIM DENGESİZLİĞİ

Ev tipi Seviye 1 ve Seviye 2 şarj cihazlarının ezici çoğunluğu tek fazlıdır ve üç fazlı bir dağıtım sekonderinin yalnızca bir fazına bağlanır. Araç satın alma ve evde şarj cihazı kurma kararlarını dağıtım şirketi koordine etmez; her hane bu kararı kendi başına verir. Bu yüzden bir servis transformatörünün hizmet alanında EA kullanımı yaygınlaştıkça, transformatördeki faz yüklenme dağılımı ciddi biçimde dengesizleşebilir. Birkaç şarj cihazının tesadüfen aynı faza kurulduğu yerlerde bu durum özellikle belirgindir (Srivastava vd., 2023). Ortaya çıkan akım dengesizliği nötr iletkeninin yükünü artırır (Bölüm 4.2'de anlatılan üçün katı harmonik etkisi bunu daha da ağırlaştırır), transformatör kayıplarını dengeli yük hesabının öngördüğünden daha yukarı çeker ve kendisi de üç sekonder faz arasında gerilim dengesizliğine katkıda bulunabilir. Bu etkinin ne kadar ciddi olduğu konusunda literatürde farklı görüşler bulunmaktadır. Bazı çalışmalar, özellikle kümelenmiş Seviye 1 şarj cihazı kurulumlarında, bunu aktif azaltım gerektiren birinci derecede bir sorun olarak görürken (Moghbel, Masoum, & Fereidouni, 2015; Vanin vd., 2022), diğerleri gerilim ve akım dengesizliği üzerindeki etkiyi, yukarıda tartışılan gerilim düşümü ve harmonik etkilerinin yanında görece küçük bulmaktadır (Gómez & Morcos, 2003). Bu ayrışma, yerel devre topolojisinin ve tek fazlı ile üç fazlı şarj ekipmanı arasındaki özgül karışımın sonucu belirleyen önemli etkenler olduğuna işaret etmektedir.

Faz dağılımının etkisini nicel olarak göstermek için, Bölüm 3.1'de ele alınan 300 m'lik fiderin sonunda fazlara dengeli dağılmış 20 kW'lık bir temel konut yükü ile üç adet 7,4 kW'lık tek fazlı şarj cihazının bulunduğu bir durum incelenmiştir. Şarj cihazlarının her biri farklı bir faza bağlandığında nötr akımı oluşmamakta ve en çok yüklenen fazdaki gerilim düşümü %5,1 düzeyinde kalmaktadır. Üç cihazın da aynı faza bağlanması durumunda ise bu fazın akımı 125 A'e, nötr akımı da yaklaşık 97 A'e çıkmaktadır. Nötr akımı yüklü fazın akımıyla aynı fazda olduğundan, nötr iletkeni üzerindeki gerilim düşümü faz iletkenindekine eklenir. Sonuçta ilgili fazdaki gerilim düşümü %18,6'ya ulaşmaktadır. Başka bir deyişle, fidere bağlanan toplam güç değişmediği hâlde, yalnızca şarj cihazlarının aynı faza toplanması gerilim düşümünü yaklaşık 3,6 kat artırmaktadır. Bu durumda oluşan nötr noktası kayması, yüklü fazın gerilimini düşürürken diğer iki fazın gerilimini yükseltir ve fazlar arasında belirgin bir gerilim dengesizliği ortaya çıkar. Şekil 6'daki Monte Carlo analizinde gerilim sınırının transformatör sınırından önce aşılmasının temel nedeni de budur. Bu sonuçlar, dağıtım şirketinin bilgisi dışında yapılan tek fazlı şarj cihazı kurulumlarının ciddi bir planlama sorunu oluşturabileceğini göstermektedir.

7. AZALTIM STRATEJİLERİ

7.1. Koordineli ve Akıllı Şarj

En kapsamlı biçimde incelenmiş azaltım yaklaşımı akıllı ya da koordineli şarjdır (Wang, Liu, Du, & Kong, 2016). Bu yaklaşımda tek tek şarj cihazlarının zamanlaması, şarj hızı ya da faz ataması ayarlanır. Ayarı bir dağıtım şirketi veya toplayıcı (aggregator) merkezi olarak yapabileceği gibi, yerel ölçümlere dayanan dağıtık bir düzenle de yapılabilir; her iki durumda da amaç toplam yük profilini düzleştirmek ve şarj tepelerinin üst üste binmesini önlemektir. Önerilen dağıtık koordinasyon şemalarında her şarj cihazı, akıllı sayaçlar üzerinden elde edilen yerel transformatör yüklenmesi ya da bara gerilimi ölçümüne göre kendi şarj hızını kısar. Böylece merkezi bir kontrol mimarisine gerek kalmadan transformatörün aşırı yüklenme riski azalır, gerilim profili iyileşir ve faz akımı dengesizliği sınırlanır; üstelik bunların hepsi aynı anda gerçekleşir (Moghbel vd., 2015). Zaman dilimli (Time Of Use - ToU) fiyatlandırma sinyallerini doğrudan yük kontrolü ve optimal dağıtımla birleştiren merkezi yaklaşımlar ise benzetimlerde, koordinasyonsuz şarja kıyasla yük sıçramalarını, gerilim sapmasını ve transformatör ömür kaybını önemli ölçüde azaltmıştır. Bu yaklaşımlar tek başına ToU fiyatlandırmasından da daha iyi sonuç verir. Çünkü ToU fiyatlandırması kendi başına bırakıldığında talep tepesini gerçekten düzleştirmek yerine, onu yine koordinasyonsuz olan yeni bir puant dışı zamana kaydırmakla yetinebilir (Acharige vd., 2025).

Koordineli şarjın etkisini somutlaştırmak için, Bölüm 3.2'de ele alınan 250 kVA'lık transformatörün beslediği 120 konuttan 20'sinde (yaklaşık %17) EA bulunduğu bir senaryo incelenmiştir. Her aracın günlük enerji ihtiyacının 10 kWh olduğu ve bu ihtiyacın 7,4 kW'lık bir şarj cihazıyla karşılandığı kabul edilmiştir. Şekil 5'te görüldüğü üzere, araçların eve dönüşte koordinasyonsuz biçimde şarja başlaması akşam tepesini 170 kVA'dan 318 kVA'ya çıkarmakta ve transformatörü yaklaşık %27 aşırı yüklemektedir. Şarjın ucuz tarifenin başladığı saate kaydırıldığı ToU senaryosunda tepe 274 kVA'ya inmekle birlikte transformatör yine anma gücünün üzerinde yüklenmektedir. Aynı 200 kWh'lik toplam enerjinin 23:00–07:00 arasına eşit olarak yayıldığı koordineli şarjda ise araç başına ortalama şarj gücü yalnızca 1,25 kW'a düşmektedir. Bu durumda gece yükü ortalama 114 kVA (%46) düzeyinde kalmakta ve günün en yüksek yükü EA'sız durumdaki 170 kVA'lık (%68) akşam tepesi olmaktadır. Görüldüğü üzere aynı enerji ihtiyacı, yalnızca şarjın zamanlaması değiştirilerek, %27'lik aşırı yükten %68'lik bir yüklenmeye indirilebilmektedir. Şarj gücündeki bu düşüş harmonik akımları ve gerilim düşümünü de orantılı olarak azaltır. Ayrıca Bölüm 5.1'de gösterildiği üzere ömür kaybının büyük bölümü akşam tepesindeki birkaç

saatte gerçekleştiğinden, koordineli şarjın transformatör ömrüne katkısı yüklenmedeki iyileşmeden de büyüktür.

7.2. Tarife Tasarımı ve Talep Tarafı Yönetimi

Zaman dilimli tarifeler ve doğrudan yük kontrolü programları, şebekeye görece az yeni donanım eklenmesini gerektirdikleri için uygulamada hâlâ en yaygın kullanılan azaltım araçlarıdır. Saha ve benzetim çalışmaları, ToU tabanlı şarj yönetiminin dağıtım düzeyinde tepe talebi ölçülebilir biçimde düşürdüğünü ve transformatörün aşırı yüklenme riskini azalttığını bildirmektedir. Ne var ki sağlanan faydanın büyüklüğü büyük ölçüde iki etkene bağlıdır: tarifeye yanıt veren abone sayısı ve bu yanıtların birbirinden kopuk, koordinasyonsuz kalıp kalmadığı. Koordinasyonsuz kalan yanıtlar, puant dışı pencerenin başında kendi başına yeni ve eş zamanlı ikincil tepeler yaratabilir (Ibrahim vd., 2024). Bu durum Şekil 5'te ToU senaryosuna ait eğride açıkça görülmektedir.

7.3. Şebeke Güçlendirme ve Ekipman Seçimi

Koordinasyonun tek başına yüklenmeyi ve gerilimi sınırlar içinde tutmaya yetmediği yerlerde, geleneksel şebeke güçlendirmesi, sermaye yoğun olsa da doğrudan bir çözüm olmayı sürdürmektedir. Servis transformatörlerini büyütmek, aşırı yüklenen sekonder hatları kısaltmak ya da iletkenlerini yenilemek ve yerel gerilim regülasyonu eklemek bunlardan bazılarıdır. Ekipman düzeyindeki tercihler de işe yarayabilmektedir. Bölüm 5.3'te belirtildiği gibi transformatör çekirdek malzemesinin seçimi, aynı EA yüklenmesi altında ısıl performansı somut biçimde değiştirmektedir. Yerel şebeke ekipmanına entegre edilen gerilim tabanlı düşüm (droop) denetleyicilerinin de düşük ve orta düzey EA penetrasyonunda düşük gerilim koşullarını tamamen giderdiği gösterilmiştir. Yine de yüksek penetrasyonda ve yüksek eş zamanlı şarj gücünde bu denetleyicilerin etkinliği azalır; düşük gerilim sorununu hafifletirler ama ortadan kaldıramazlar (Azeem vd., 2026; Harish & Surendra, 2022). Örneğin Bölüm 3.2'de ele alınan şebekede 250 kVA'lık transformatörün 400 kVA'lık bir birimle değiştirilmesi, koordinasyonsuz şarjdaki %127'lik yüklenmeyi %80'e indirmektedir.

7.4. Güç Elektroniği ve Şarj Cihazı Düzeyindeki Çözümler

Şarj cihazı düzeyinde harmoniklerle baş etmenin en iyi yolu, sorunu kaynağında çözmektir. Aktif PFC ön katı üzerine kurulan şarj cihazları, pasif doğrultmalı tasarımlara göre akım bozulmasını doğası gereği çok daha etkili biçimde sınırlar. Birçok çalışma da sinüse yakın, birim güç faktörlü akım çeken ve geleneksel şarj donanımına kıyasla THD'yi belirgin biçimde düşüren "akıllı şarj cihazı" tasarımları önermekte ya da bu tasarımları uygulamada göstermektedir (Gómez & Morcos, 2003; Nour vd., 2020). Eski veya düşük

maliyetli şarj donanımının değiştirilemediği durumlarda, abone bağlantısında ya da trafo merkezi düzeyinde yerel aktif veya pasif harmonik filtreleme tamamlayıcı bir önlem olarak önerilmiştir. Ancak bu önlemden beklenen fayda, filtre maliyetiyle birlikte tartılmalıdır. Filtrelemenin, eklenen aktif güç talebinin gerilim düşümü ve transformatör yüklenmesi üzerindeki temel etkilerini hiç çözmediği de akılda tutulmalıdır.

Bu bölümde ele alınan azaltım yaklaşımlarının hedefledikleri sorunlar ve nicel etkileri Tablo 5'te özetlenmiştir.

Tablo 5. EA şarjı kaynaklı güç kalitesi sorunlarına yönelik azaltım stratejilerinin nicel etkileri

Strateji	Hedeflediği sorun	Nicel etki	Kaynak
Şarj yönetimi ve tarife			
Koordineli / akıllı şarj	Trafo yüklenmesi, ısıl yaşlanma	Trafo tepe yükü 318 → 170 kVA (**−%47**); yüklenme %127 → %68	Bu çalışma (Şekil 5); Acharige vd. (2025)
Faz ataması / dağıtık şarj kontrolü	Faz dengesizliği, gerilim düşümü	Yüklü fazda gerilim düşümü %18,6 → %5,1 (**−%73**)	Bu çalışma (Bölüm 6); Moghbel vd. (2015)
Zaman dilimli tarife (ToU)	Trafo yüklenmesi	Trafo tepe yükü 318 → 274 kVA (**−%14**); yüklenme hâlâ %109	Bu çalışma (Şekil 5); Ibrahim vd. (2024)
Şebeke ve ekipman			
Transformatör büyütme (250 → 400 kVA)	Trafo yüklenmesi	Koordinasyonsuz şarjda yüklenme %127 → %80 (**−%37**)	Bu çalışma
Amorf çekirdekli transformatör	Kayıplar, ısıl yaşlanma	Yük kaybı **−%18,6**; yağ sıcaklığı artışı **−%25**	Azeem vd. (2026)
Gerilim tabanlı düşüm (droop) denetleyicisi	Düşük gerilim	Düşük–orta penetrasyonda düşük gerilim koşullarının **tamamı** giderilir	Azeem vd. (2026); Harish ve Surendra (2022)
Güç elektroniği			
Aktif PFC'li şarj cihazı	Harmonik bozulma, trafo kapasitesi	THD_I %102,5 → %4,1 (**−%96**); izin verilen trafo akımı 0,74 → 1,00 pu (**+%34**)	Bu çalışma (Tablo 4)

Kaynak: Tabloda belirtilen çalışmalar ve yazarın hesaplamaları.

8. SONUÇ VE GELECEK ARAŞTIRMA YÖNELİMLERİ

Konut tipi EA şarjı, dağıtım şebekelerine mekânsal ve zamansal olarak kümelenen yeni bir yük profili getirmektedir. Ancak mevcut dağıtım şebekeleri bu tür bir yük örüntüsü öngörülerek tasarlanmamıştır. Burada incelenen literatür, ortaya çıkan strese en çok maruz kalan şebeke varlığının dağıtım transformatörü olduğu noktasında birleşmektedir. Gerilim düşümü, harmonik akım enjeksiyonu ve transformatörün ısıl yaşlanması fiziksel olarak birbirinden ayrı, ama birbiriyle

etkileşen mekanizmalardır. Harmonik akımlar, gerilim düşümünü belirleyen temel bileşen yüklenmesinden bağımsız olarak transformatör kayıplarını artırır ve ikisi de aynı ekipman üzerinde eş zamanlı etki eder. Bu yüzden mekanizmalardan yalnızca birini tek başına ele alan bir değerlendirme, birleşik etkiyi genellikle olduğundan küçük gösterir. Eldeki kanıtlar ayrıca etkinin şiddetinin bazı etkenlere son derece duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu etkilerin büyüklüğü; şarj cihazı teknolojisine (aktif güç faktörü düzeltmeli [PFC] ya da pasif doğrultuculu tasarım), şarj seviyesine, penetrasyon oranına ve en önemlisi, EA benimsenmesinin belirli fiderlerde mekânsal olarak kümelenme derecesine bağlıdır. Bu da toplam ulusal ya da bölgesel EA penetrasyon istatistiklerinin, herhangi bir dağıtım transformatörünün gerçekte maruz kaldığı yüklenmeyi anlamak için zayıf bir gösterge olduğu anlamına gelmektedir.

Bölüm boyunca verilen sayısal örnekler bu duyarlılığı somut olarak ortaya koymaktadır. Basit bir radyal fiderde 10 adet Seviye 2 şarj cihazı gerilim düşümünü %2,4'ten %11,3'e çıkarmakta (Şekil 4); aynı toplam güçte yalnızca şarj cihazlarının aynı faza toplanması yüklü fazdaki düşümü %5,1'den %18,6'ya taşımaktadır (Bölüm 6). Tipik bir 250 kVA'lık transformatör, en kötü durumda abonelerin yalnızca yaklaşık %8'ine EA girdiğinde anma gücüne ulaşmakta (Bölüm 3.2), koordinasyonsuz akşam şarjı günlük ömür tüketimini yaklaşık 7 kat artırmaktadır (Şekil 8). Buna karşılık aynı enerji ihtiyacının gece saatlerine yayılması transformatör tepe yüklenmesini %127'den %68'e indirmektedir (Şekil 5).

Bazı konular ise daha fazla araştırmayı hak etmektedir. Bunlardan ilki, tanımlı bir hizmet alanında EA penetrasyonu kendiliğinden arttıkça transformatör sıcak nokta sıcaklığını ve harmonik spektrumları benzetimle değil gerçek ölçümlerle izleyen uzun soluklu saha ölçüm kampanyalarıdır. İkincisi, gerilim düşümü, harmonik kayıp ve dengesizlik etkilerini dağıtım şirketlerinin planlama araçlarında kullanılabilecek tek bir transformatör ömür kaybı tahmininde birleştiren standart yöntemlerdir. Üçüncüsü ise çift yönlü güç akışına olanak tanıyan araçtan şebekeye (V2G) ve araçtan eve (V2H) yeteneklerinin daha ayrıntılı değerlendirilmesidir. Buradaki soru, bu yeteneklerin yalnızca söz konusu olumsuz etkilerden kaçınmak için değil, bugün yönetilmeyen şarjın zorladığı aynı dağıtım şebekesine aktif olarak gerilim desteği ve tepe tıraşlama hizmeti sağlamak için nasıl kullanılabileceğidir.

KAYNAKÇA

Acharige, S. S., Haque, M. E., Arif, M. T., Hosseinzadeh, N., Hasan, K. N., Hossain, M. J., & Muttaqi, K. M. (2025). Grid integration of electric vehicles – Impact assessment and remedial measures. *Journal of Power Sources, 650*, 236697. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.236697

Alame, D., Azzouz, M., & Kar, N. (2020). Assessing and mitigating impacts of electric vehicle harmonic currents on distribution systems. *Energies, 13*(12), 3257. https://doi.org/10.3390/en13123257

Alawasa, K. M. (2026). Measurement-based analysis of power quality and harmonic distortion characteristics for electric vehicle AC charging modes. *World Electric Vehicle Journal, 17*(2), 108. https://doi.org/10.3390/wevj17020108

Azeem, F., Zidan, H., & Zahid, M. (2026). Performance assessment of distribution transformers under EV loading in the residential sector. *Electric Power Systems Research, 254*, 112663. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.112663

Blooming, T. M., & Carnovale, D. J. (2006). Application of IEEE Std 519-1992 harmonic limits. *Conference Record of 2006 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference* içinde (ss. 1–9). https://doi.org/10.1109/PAPCON.2006.1673767

Cao, C., Wang, L., & Chen, B. (2016). Mitigation of the impact of high plug-in electric vehicle penetration on residential distribution grid using smart charging strategies. *Energies, 9*(12), 1024. https://doi.org/10.3390/en9121024

Gómez, J. C., & Morcos, M. M. (2003). Impact of EV battery chargers on the power quality of distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery, 18*(3), 975–981. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.813873

Harish, B. N., & Surendra, U. (2022). A review on power quality issues in electric vehicle interfaced distribution system and mitigation techniques. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 25*(2), 656–665. https://doi.org/10.11591/ijeecs.v25.i2.pp656-665

Hoevenaars, T., LeDoux, K., & Colosino, M. (2003). Interpreting IEEE Std 519 and meeting its harmonic limits in VFD applications. *IEEE Industry Applications Society 50th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference* içinde (ss. 145–150). https://doi.org/10.1109/PCICON.2003.1242609

Ibrahim, R. A., Gaber, I. M., & Zakzouk, N. E. (2024). Analysis of multidimensional impacts of electric vehicles penetration in distribution networks. *Scientific Reports, 14*(1), 27854. https://doi.org/10.1038/s41598-024-77662-6

Iranpour, M., Narimani, M. R., & Jia, X. (2025). *Assessing EV charging impacts on power distribution systems: A unified co-simulation framework* (arXiv ön baskı No. 2505.21773). Erişim adresi: https://arxiv.org/abs/2505.21773

Lucas, A., Bonavitacola, F., Kotsakis, E., & Fulli, G. (2015). Grid harmonic impact of multiple electric vehicle fast charging. *Electric Power Systems Research, 127*, 13–21. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.05.012

Moghbel, M., Masoum, M. A. S., & Fereidouni, A. (2015). Decentralize coordinated charging of plug-in electric vehicles in unbalanced residential networks to control distribution transformer loading, voltage profile and current unbalance. *Intelligent Industrial Systems, 1*(2), 141–151. https://doi.org/10.1007/s40903-015-0008-7

Nour, M., Chaves-Ávila, J. P., Magdy, G., & Sánchez-Miralles, Á. (2020). Review of positive and negative impacts of electric vehicles charging on electric power systems. *Energies, 13*(18), 4675. https://doi.org/10.3390/en13184675

Rassaei, F., Soh, W. S., & Chua, K. C. (2015). A statistical modelling and analysis of residential electric vehicles' charging demand in smart grids. *2015 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)* içinde (ss. 1–5). https://doi.org/10.1109/ISGT.2015.7131894

Srivastava, A., Manas, M., & Dubey, R. K. (2023). Electric vehicle integration's impacts on power quality in distribution network and associated mitigation measures: A review. *Journal of Engineering and Applied Science, 70*(1), 32. https://doi.org/10.1186/s44147-023-00193-w

Vanin, M., Van Acker, T., Ergun, H., D'hulst, R., Vanthournout, K., & Van Hertem, D. (2022). Congestion mitigation in unbalanced residential networks with OPF-based demand management. *Sustainable Energy, Grids and Networks, 32*, 100936. https://doi.org/10.1016/j.segan.2022.100936

Wang, Q., Liu, X., Du, J., & Kong, F. (2016). Smart charging for electric vehicles: A survey from the algorithmic perspective. *IEEE Communications Surveys & Tutorials, 18*(2), 1500–1517. https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2518628

BÖLÜM 18

Proteus ile Temel Elektronik Devrelerin Analizi

İzzet Yavuz[1]
Salih Erdurucan[2]

[1] Ankara Üniversitesi Nallıhan MYO / Elektrik Enerjisi Üretim İletim ve Dağıtımı Programı, ORCID: 0000-0002-2309-3815
[2] Ankara Üniversitesi Nallıhan MYO / Bilgisayar Programcılığı Programı
ORCID: 0000-0002-1061-7712

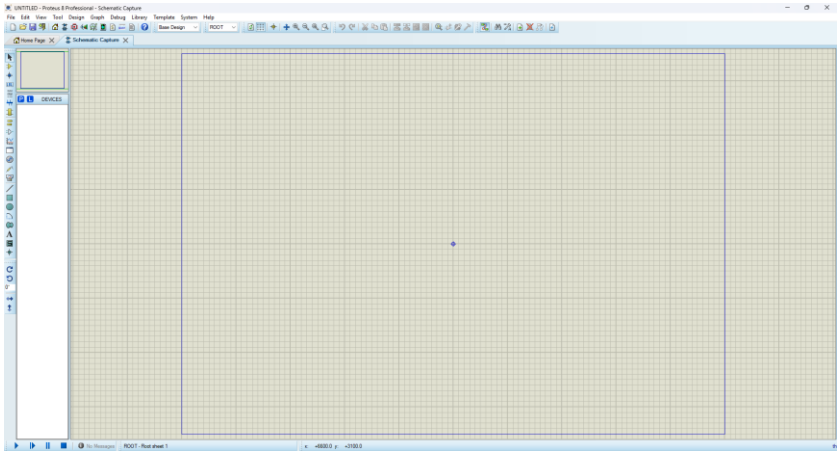
1. Giriş

Elektronik devre elemanlarının çalışma özelliklerinin anlaşılması, bu elemanların farklı devre koşullarındaki davranışlarının incelenmesini gerektirmektedir. Bu amaçla teorik hesaplamaların yanı sıra laboratuvar uygulamalarından ve bilgisayar destekli benzetim programlarından yararlanılmaktadır. Direnç, diyot ve kondansatör gibi devre elemanlarının davranışları genellikle teorik hesaplamalar ve laboratuvar uygulamalarıyla incelenmektedir (Kobak, 2006). Laboratuvar imkânlarının sınırlı olduğu durumlarda ise bilgisayar destekli benzetim programlarından yararlanılarak devrelerin farklı çalışma koşullarındaki davranışları incelenebilmektedir. Akkağıt ve Tekin (2012), yaptıkları çalışmada simülasyon destekli uygulamaların öğrencilerin teorik bilgilerini kontrol etmelerine ve elde ettikleri sonuçları karşılaştırmalarına katkı sağladığını belirtmiştir. Elektronik devrelerin tasarım ve analizinde kullanılan Proteus yazılımı, devrelerin benzetim ortamında oluşturulmasına ve elektriksel büyüklüklerin incelenmesine imkân sağlamaktadır (Özer & Kaboğlu, 2023).

Bu kitap bölümünde, Proteus yazılımı kullanılarak temel elektronik devrelerin analizi ele alınmaktadır. Teorik olarak hesaplanan değerler ile Proteus ortamında elde edilen simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır.

2. Proteus Yazılımı ve Devre Analizinde Kullanımı

Elektronik devrelerin tasarlanması ve analiz edilmesi için birçok bilgisayar destekli devre tasarımı programı kullanılmaktadır. Proteus da bu yazılımlardan biridir. Proteus, geniş devre elemanı kütüphanesi ve farklı elektronik devrelerin benzetimine yönelik sunduğu araçlarla devre tasarımında kullanılmaktadır. Labcenter Electronics tarafından geliştirilen bu program, elektronik devrelerin çizilmesine, devrede kullanılan malzemelerin farklı çalışma koşullarında verdikleri tepkilerin incelenmesine olanak sağlamaktadır (Labcenter Electronics, t.y.). Programda bulunan sanal ölçüm araçlarıyla temel elektriksel büyüklükler incelenebilmekte ve elde edilen sonuçlar devre kurulmadan önce değerlendirilebilmektedir. Bu yaklaşım, devre elemanlarının çalışma davranışlarının teorik hesaplamalarla birlikte incelenmesine olanak sağlamaktadır. Proteus yazılımının elektronik devrelerin analizinde kullanımına yönelik literatürde farklı çalışmalar bulunmaktadır. Özer, Kıvrak, Oğuz, Kelek ve Karaca (2021), Proteus ortamında tasarladıkları fırçasız doğru akım motor sürücü devresinin simülasyonunu gerçekleştirerek kontrol ve çıkış sinyallerini incelemiştir. Benzer şekilde Özer ve Kaboğlu (2023), gerilim ve akım kontrollü düşürücü tip dönüştürücü devresini Proteus ortamında tasarlamış, simülasyon sonuçları ile deneysel ölçümleri karşılaştırarak sonuçların birbiriyle uyumlu olduğunu belirlemiştir.



Şekil 1. Proteus yazılımının kullanıcı arayüzü.

Proteus yazılımının kullanıcı arayüzü Şekil 1'de gösterilmiştir. Kullanıcılar bu arayüz üzerinden devre elemanlarını seçerek çalışma alanına yerleştirebilmekte ve elemanlar arasındaki bağlantıları oluşturarak devre tasarımını tamamlayabilmektedir. Devre bağlantıları tamamlandıktan sonra çalıştırma düğmesi kullanılarak simülasyon başlatılabilmektedir. Gerilim kaynakları ve ölçüm araçlarının özellikleri değiştirilerek devrelerin farklı çalışma koşullarındaki davranışları incelenebilmektedir.

3. Proteus ile Temel Elektronik Devre Uygulamaları

Bu bölümde, temel elektronik devrelerin Proteus yazılımı kullanılarak analizi gerçekleştirilmektedir. İlk olarak devrelerin teorik hesaplamaları yapılmakta, ardından aynı devreler Proteus ortamında oluşturularak simülasyon sonuçları elde edilmektedir. Teorik hesaplamalar ile simülasyon sonuçları karşılaştırılarak devrelerdeki gerilim ve akım değerlerinin birbiriyle uyumu değerlendirilmektedir.

3.1. Ohm Kanunu ve Dirençli Devre Analizi

Ohm Kanunu, bir direnç üzerindeki gerilim ile dirençten geçen akım arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir. Bu uygulamada, sabit bir direnç değeri kullanılarak farklı besleme gerilimlerinde devreden geçen akımın değişimi incelenmektedir. Akım değerleri öncelikle Ohm Kanunu yardımıyla hesaplanmakta, ardından Proteus ortamında yapılan ölçümlerle karşılaştırılmaktadır.

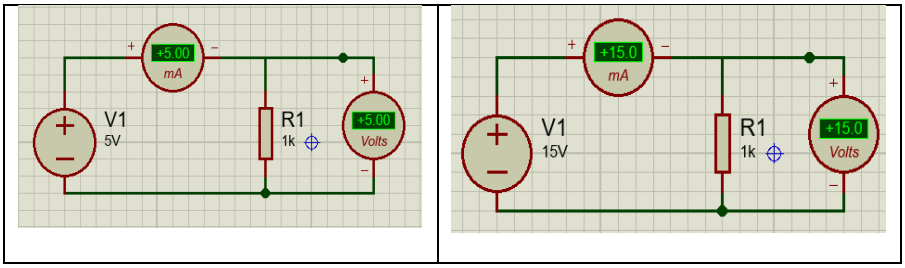
$$\boldsymbol{V = I.R}$$

Denklemde V gerilimi, I akımı ve R direnç değerini ifade etmektedir. Uygulamada kullanılan devre elemanları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Dirençli devre analizinde kullanılan devre elemanları

Malzeme	Proteus Bileşeni	Adet/Değer
DC gerilim kaynağı	BATTERY	1 / 5–15 V
Direnç	RES	1 / 1 kΩ
Ampermetre	DC AMMETER	1
Voltmetre	DC VOLTMETER	1
Toprak bağlantısı	GROUND	1

Devrede ampermetre seri, voltmetre ise dirence paralel olacak şekilde bağlanmıştır.



Şekil 2. Proteus ortamında oluşturulan dirençli DC devreler

Tablo 2. Teorik hesaplama ve Proteus simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Gerilim (V)	Direnç (Ω)	Teorik Akım (mA)	Proteus Akımı (mA)
5	1000	5,00	5,00
15	1000	15,00	15,00

Tablo 2 incelendiğinde, Ohm Kanunu kullanılarak hesaplanan teorik akım değerleri ile Proteus ortamında elde edilen simülasyon sonuçlarının birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Besleme geriliminin 5 V'tan 15 V'a yükseltilmesiyle devre akımının da 5 mA'den 15 mA'e arttığı görülmüştür.

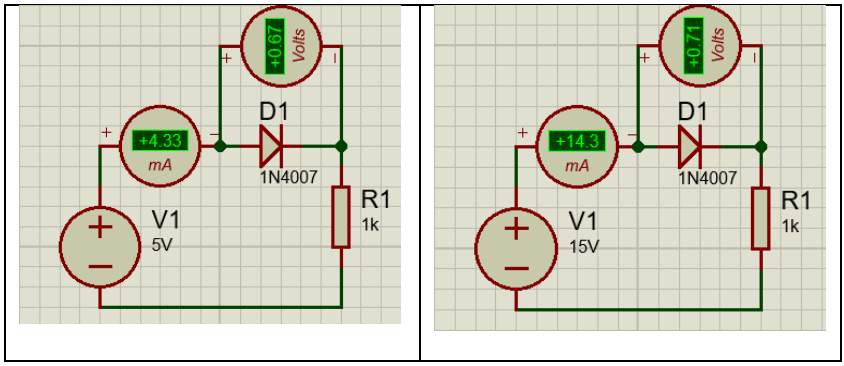
3.2. Diyotlu Devrelerin Analizi

Bu uygulamada, silisyum diyotun (1N4007) ileri polarma durumundaki elektriksel davranışı Proteus yazılımı kullanılarak incelenmektedir. DC gerilim kaynağı, direnç ve diyottan oluşan seri devrede, farklı besleme gerilimleri uygulanarak devreden geçen akım ve diyotun uçları arasındaki gerilim ölçülmüştür. Elde edilen simülasyon sonuçları teorik hesaplamalarla karşılaştırılmıştır.

Tablo 3. Diyotlu devre analizinde kullanılan devre elemanları

Devre Elemanı	Proteus Bileşeni	Değer / Adet
DC gerilim kaynağı	BATTERY	1 adet (5–15 V)
Silisyum diyot	1N4007	1 adet
Direnç	RES	1 kΩ / 1 adet
Ampermetre	DC AMMETER	1 adet
Voltmetre	DC VOLTMETER	1 adet
Toprak bağlantısı	GROUND	1 adet

Gerilim kaynağı, silisyum diyot ve direnç seri bağlanmıştır. Diyodun anot ucu ampermetre üzerinden kaynağın pozitif tarafına, katot ucu ise dirence bağlanmıştır. Ampermetre devreye seri, voltmetre ise diyotun uçlarına paralel bağlanmıştır.



Şekil 3. Proteus ortamında oluşturulan silisyum diyotlu devreler

Teorik hesaplamalarda, silisyum diyotun ileri polarma durumundaki gerilim düşümü yaklaşık 0,7 V kabul edilmiştir. Bu yaklaşım kullanılarak devre akımı aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır :

$$I = \frac{Vs - Vd}{R}$$

Burada Vs kaynak gerilimini, Vd diyot gerilimini, R direnç değerini ve I devre akımını ifade etmektedir.

Tablo 4. Silisyum diyotlu devrenin teorik hesaplama ve Proteus simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Kaynak Gerilimi (V)	Teorik Diyot Gerilimi (V)	Proteus Diyot Gerilimi (V)	Teorik Akım (mA)	Proteus Akımı (mA)
5	0,70	0,67	4,30	4,33
15	0,70	0,70	14,30	14,30

Tablo 4 incelendiğinde, teorik hesaplamalar ile Proteus simülasyon sonuçlarının birbiriyle büyük ölçüde uyumlu olduğu görülmektedir. Besleme geriliminin 5 V'tan 15 V'a yükseltilmesiyle devre akımı 4,33 mA'den 14,30 mA'e artarken diyot üzerindeki gerilim düşümünün yaklaşık 0,7 V seviyesinde kaldığı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, silisyum diyotun ileri polarma durumundaki çalışma davranışının teorik yaklaşımla uyumlu olduğunu göstermektedir.

4. Sonuç

Bu çalışmada, temel elektronik devrelerin analizi Proteus yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçları teorik hesaplamalarla karşılaştırılmıştır. İlk uygulamada Ohm Kanunu esas alınarak dirençli bir devre oluşturulmuş ve teorik hesaplamalar ile simülasyon sonuçlarının birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. İkinci uygulamada ise silisyum diyot içeren bir devrenin ileri polarma durumundaki davranışı ele alınmıştır. Diyot üzerindeki gerilim düşümünün yaklaşık 0,7 V seviyesinde kaldığı ve kaynak geriliminin artırılmasıyla devreden geçen akımın arttığı belirlenmiştir.

Her iki uygulamada da teorik hesaplamalar ile simülasyon sonuçlarının büyük ölçüde uyuştuğu görülmüştür. Diyotlu devrede teorik ve simülasyon sonuçları arasında gözlenen küçük farklılıkların, teorik hesaplamalarda kullanılan sabit gerilim düşümü yaklaşımı ile simülasyonda kullanılan diyot modelinin özelliklerinden kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir. Elde edilen bulgular, Proteus yazılımının temel elektronik devrelerin çalışma prensiplerinin incelenmesinde ve teorik bilgilerin uygulama ortamında değerlendirilmesinde kullanılabilecek yararlı bir araç olduğunu göstermektedir. Ayrıca bilgisayar destekli devre analizinin, fiziksel devre kurulmadan önce farklı çalışma koşullarının incelenmesine imkân sağlaması bakımından elektronik eğitimi ve devre tasarım süreçlerine katkı sunabileceği değerlendirilmektedir.

Kaynakça

Akkağıt, Ş. F., & Tekin, A. (2012). Simülasyon tabanlı öğrenmenin ortaöğretim öğrencilerinin temel elektronik ve ölçme dersindeki başarılarına etkisi. Ege Eğitim Dergisi, 13(2), 1–12. *https://dergipark.org.tr/tr/pub/egeefd/article/67206*

Kobak, B. (2006). Bir temel elektronik deney setinin tasarımı ve imali (Yüksek lisans tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Labcenter Electronics. (t.y.). Advanced simulation features. *https://www.labcenter.com/advancedsim/*

Özer, T., & Kaboğlu, A. (2023). Gerilim ve akım kontrollü düşürücü tip dönüştürücü tasarımı ve uygulaması. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 13(3), 566–579. *https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1215550*

Özer, T., Kıvrak, S., Oğuz, Y., Kelek, M. M., & Karaca, A. (2021). DsPic33fj32mc204 mikroişlemci tabanlı Hall sensörlü fırçasız doğru akım motor sürücüsü tasarımı ve Proteus simülasyon uygulaması. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 21(4), 820–828. *https://doi.org/10.35414/akufemubid.889532*

BÖLÜM 19

Türkiye'de Sürdürülebilir Konut Tasarımında Kenevir ve Ahşap Esaslı Biyokompozitlerin Kullanım Potansiyeli

Aylin Özodabaş[1]
Miraç Alaf[2]

[1] Doç. Dr., Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bilecik, Türkiye
[2] Prof. Dr.

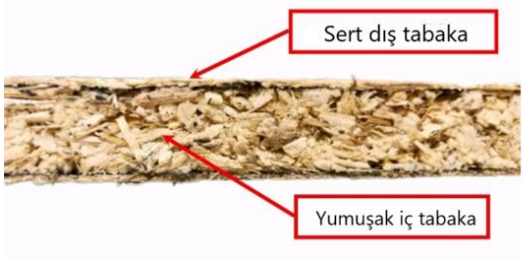
1. Giriş

Küresel ölçekte yaşanan iklim değişikliği, kaynakların tükenmesi ve çevresel tahribatlar, yapı sektörünü ciddi şekilde dönüşmeye zorlamaktadır (İbrahim Yıldırımçakar, 2022). İnşaat sektörü, enerji tüketimi ve karbon salımı açısından en yüksek çevresel etkiye sahip alanlardan biridir. Özellikle çimento, çelik ve plastik esaslı yapı malzemeleri, üretim süreçlerinde yüksek oranda fosil yakıt tüketmekte ve atmosfere yoğun miktarda sera gazı salmaktadır (Liang et al., 2023)]. Bu bağlamda, yapı teknolojilerinde düşük karbon ayak izine sahip, yenilenebilir ve yerli kaynaklara dayalı alternatif malzemelerin geliştirilmesi hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik bağımsızlık açısından stratejik önem taşımaktadır (Ranjetha et al., 2022).

Ahşap, kontrplak, MDF ve sunta gibi ahşap bazlı panellerin (WBP) üretiminde temel hammadde olmaya devam etmektedir. Bu paneller, talaş, mobilya üretim atıkları ve geri dönüştürülmüş ahşap dâhil çeşitli kaynaklardan elde edilmektedir. Lif levha ve sunta üretimi, küresel ölçekte en yaygın kullanılan kompozit yöntemlerden biri olsa da, orman tahribatı, iklim değişikliği ve kaynakların tükenmesine ilişkin endişeler nedeniyle ahşaba alternatif malzemelere yönelik ilgi giderek artmaktadır. Kontrplak, MDF, sunta ve OSB gibi ahşap esaslı paneller; inşaat, mobilya ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan kompozit malzemelerdir. Bu paneller, ahşap parçacıkları veya liflerinin ısı ve basınç altında yapıştırıcılarla birleştirilmesiyle üretilir. Sonuç olarak, ham ahşaba kıyasla daha yüksek mekanik mukavemet, boyutsal stabilite ve dayanıklılık sunarlar. Maliyet etkinlikleri, kolay bulunabilirlikleri ve çok yönlü kullanım özellikleri nedeniyle WBP'lere olan talep giderek artmaktadır (Bawono et al., 2025).

Bu bağlamda, güncel yapı sektörünün çevresel etkileri, geleneksel mimari yaklaşımların yeniden değerlendirilmesini de zorunlu kılmaktadır. Anadolu ve Dünya genelindeki geleneksel konutlar, yüzyıllardır yerel ve döngüsel ekonomi prensiplerine dayanarak inşa edilmiştir (Gençer Funda, 2024). Kerpiç, taş ve ahşap gibi yerel kaynaklı doğal malzemelerin kullanıldığı bu yapılar, modern betonarme ve çelik yapılara kıyasla çok daha düşük enerjiye ve karbon ayak izine sahiptir. Geleneksel yapım tekniklerinde kullanılan doğal malzemeler aynı zamanda yapıların nefes alabilirliğini artırarak iç mekân hava kalitesini iyileştirmekte ve pasif iklimlendirme sağlayarak işletme enerjisi ihtiyacını doğal yollarla düşürmektedir (Lakot Alemdağ et al., 2023). Bu nedenle, sürdürülebilir bir yapısal dönüşüm, yalnızca yeni malzemelerin geliştirilmesinden değil, aynı zamanda geleneksel yapı bilgisinin modern tekniklerle entegre edilmesinden de geçmektedir. Bu tarihsel ve çevresel bilinç, kenevir ve mühendislik ahşapları gibi biyokompozit çözümlere yönelik artan ilgiyi besleyen önemli bir kaynaktır. Bu dönüşüm ihtiyacı doğrultusunda, biyokompozit yapı malzemeleri giderek daha fazla ilgi görmeye başlamıştır. Biyokompozitler; doğada bol bulunan ve kısa

sürede yenilenebilen lifsel bitkiler (kenevir, keten, jüt vb.) ile doğal veya düşük toksisiteli bağlayıcıların birleşiminden oluşur. Bu malzemeler, hafiflik, nefes alabilirlik, geri dönüşebilirlik ve enerji verimliliği gibi pek çok avantajı bir arada sunarak, çevre dostu yapı sistemlerinin temel yapıtaşları olma potansiyeline sahiptir. Şekil 2'de mısır özünden oluşturulmuş panel prototipine yer verilmiştir (Platt et al., 2023).



Şekil 2. Mısır özü paneli (Bawono et al., 2025)

Bu makalede, biyokompozit yapılar içinde özellikle kenevir lifi ve mühendislik ahşaplarının (glulam, CLT vb.) entegrasyonu ele alınmakta; bu iki doğal malzemenin birlikte kullanımıyla oluşabilecek hibrit yapı sistemlerini incelenmektedir. Ahşap, taşıyıcı sistemlerde; kenevir ise yalıtım, dolgu ve panel elemanlarında kullanılarak tamamen doğal, karbon-negatif yapı çözümleri ortaya koymaktadır. Ayrıca Türkiye özelinde, bu malzemelerin yerel üretim potansiyeli, mevcut yasal çerçeveler, teknik altyapı durumu ve piyasa kabulü gibi konular çok yönlü olarak değerlendirilmektedir (Siouta et al., 2024)., (Shelly et al., 2025), (Wang et al., 2023).

Türkiye, tarım arazileri açısından önemli bir avantaja sahiptir. Kenevir gibi hızlı büyüyen, düşük girdi isteyen ve çok yönlü kullanılabilen bir bitkinin yeniden üretim sürecine alınması hem kırsal kalkınmayı destekleyecek hem de inşaat sektörüne yeni bir yön kazandıracaktır (Göre & Kurt, 2021). Bununla birlikte, glulam ve CLT gibi modern ahşap teknolojilerinin yaygınlaşmasıyla birlikte, endüstriyel ahşap sistemlerin kenevirle entegre edilmesi biyokompozit yapı üretimi açısından önemli bir eşik oluşturabilir.

Türkiye'de kenevir ve ahşabın birlikte değerlendirildiği biyokompozit yapı sistemleri bağlamında, mevcut durum analizi yapılmakta; teknik ve çevresel fırsatlar ortaya konulmakta ve yaygınlaşmayı engelleyen faktörler irdelenmektedir. Son olarak, yerel ve sürdürülebilir yapı politikalarının geliştirilebilmesi adına önerilere yer verilmiştir. Tablo 1'de en çok kullanılan doğal elyafların Dünya çapında üretim miktarlarına yer verilmiştir. Şekil 2'de ise kenevir lifli kompozit ve yonga levhaların görsellerine yer verilmiştir. Kenevir levhaların, yonga levhalar gibi üretilebileceği görülmektedir (Waje, 219 C.E.).

Tablo 1. En çok kullanılan ticari doğal elyafların dünya çapında üretimi (Waje, 219 C.E.).

Elyaflar	**Dünya üretimi (10^3 ton)**
Şeker kamışı	75.000
Bambu	30.000
Jüt	2300
Kenaf	970
Sisal	378
Kenevir	214
Coir	100
Ramie	100
Abaca	70



Şekil 2. Doğal elyaf kompozit I kirişler (uzun kenevir lifi kompozit) ve yönlendirilmiş yonga levha (OSB) (Waje, 219 C.E.)

İklim krizinin derinleşmesiyle birlikte yapı sektörü, düşük karbon salımı sağlayan, enerji verimli ve yerli kaynaklara dayalı malzeme arayışına yönelmiştir. UNEP'in (Birleşmiş Milletler Çevre Programı) raporlarına göre Dünya genelinde inşaat sektörü, toplam sera gazı salımının yaklaşık %38'ini oluşturmaktadır. Bu nedenle alternatif yapı malzemeleri geliştirme ihtiyacı çevresel, ekonomik ve yapısal bir zorunluluk haline gelmiştir. Biyokompozit yapılar, bu dönüşümde doğayla uyumlu, yenilenebilir ve düşük enerji tüketimli bir yol sunmaktadır (Ryłko-Polak et al., 2022).

2. Yöntem

2.1. Biyokompozit izolasyon yapı malzemeleri

Halihazırda ahşap binalarda kullanılan ısı yalıtım malzemelerine Şekil 3'te yer verilmiştir (Akkan Çavdar & Lakot Alemdağ, 2024). Biyokompozit, doğal liflerin (kenevir, keten, jüt, hindistancevizi, vs.) genellikle biyobozunur veya düşük toksiteli bir bağlayıcıyla (kireç, kil, bitkisel reçine gibi) birleştirilmesiyle elde edilen mühendislik ürünleridir (Ahmad et al., 2022). Ahşap talaşı, MDF veya OSB içine kenevir lifi eklenerek oluşturulmuş hibrit panellerde alternatifler arasında yer alabilir. Aşağıda biyokompozitlere ait temel özelliklere yer verilmiştir (Devrim, 2023).



Şekil 3. Ahşap binalarda kullanılan ısı yalıtım malzemeleri ve örnekleri (Akkan Çavdar & Lakot Alemdağ, 2024).

Temel Özellikleri

- Hafif ve dayanıklı
- Isı ve ses yalıtımı yüksek
- Karbon salımı çok düşük
- Geri dönüştürülebilir veya biyobozunur (Devrim, 2023)**:**

Kullanılan kimyasal yapıştırıcılar; WBP endüstrisindeki yapıştırıcıların çoğu, fenol veya üre bazlı reçineler içeren formaldehit tipi yapıştırıcılardır. Formaldehit, fenoplast ve aminoplast reçinelerinde kullanılan bir çapraz bağlayıcıdır ancak kanserojen etkileri ve çevresel kirlilik riski taşır. Fenol-formaldehit (PF) yapıştırıcılar, suya ve hava koşullarına dayanıklı olup dış mekânlarda tercih edilir fakat yüksek sıcaklık ve basınç gerektirir. PF yapıştırıcılar, koyu renkli ve pürüzsüz yüzey sağlayarak estetik ve endüstriyel kullanımda avantaj sunar. Üre-formaldehit (UF) yapıştırıcılar, homojen yüzey sağlayan ve düşük sıcaklıkta üretilebilen sistemlerdir. UF yapıştırıcıları formaldehit emisyonu nedeniyle risk taşır (Lim et al., 2021).

Biyobazlı yapıştırıcılar; doğal malzeme bazlı yapıştırıcılar, sağlık ve çevre kaygıları nedeniyle formaldehit bazlı yapıştırıcılara alternatif olarak öne çıkmaktadır. Araştırmalar, özellikle bitki bazlı malzemelerin sürdürülebilirlik

açısından yüksek potansiyel sunduğunu göstermektedir. Tanen, su bazlı bir organik bileşik olarak WBP yapıştırıcılarında formaldehit eklenerek kullanılmaktadır. Furfural gibi sertleştiricilerle kombinasyonu, yonga levhalar için uluslararası standartlara uygun iç bağ mukavemeti sağlayabilir. Buna rağmen tanen bazlı yapıştırıcılar, PF ve UF sistemlerine kıyasla düşük mekanik mukavemet ve zayıf hava koşullarına dayanıklılık gibi sorunlar olabilir. Lignin, yapıştırıcı teknolojisinde önemli bir doğal malzeme olarak görülmekte ve Kraft lignin ile 5-HMF gibi bileşenlerle tamamen biyobazlı yapıştırıcıların geliştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Ancak endüstriyel ölçekte uygulanabilirlik için reaktivite ve mukavemet iyileştirilmelidir. Ligninin yapıştırıcı potansiyelini artırmak için nişasta gibi karbonhidrat bazlı polimerlerle hibrit formülasyonlar araştırılmaktadır. Bu kapsamlı araştırmalar, endüstriyel üretimde sürdürülebilir çözümlerin önemini vurgulamakta ve doğal malzeme bazlı yapıştırıcıları geleceğin teknolojik gelişim alanlarından biri haline getirmektedir (Lim et al., 2021).

2.2. Yapım yöntemleri ve tartışma

Yukarıda bahsedilen hibrit yöntemlerle üretilecek panellerde kullanılma olasılığı olan içeriklere aşağıda yer verilmiştir. Sodyum aljinat ile kenevir lifleri bir araya getirilerek kompozit bir yapı oluşturmak teknik olarak mümkün olabilir. Bu konu ile ilgili yapılmış olan bir çalışmada hindistan cevizi lifi kullanılmıştır. İçeriklerine Tablo 2'de yer verilmiştir. Geliştirilen paneller, geleneksel ve yaygın bir çözüm olan mineral yünleri (cam yünü/taş yünü) ile karşılaştırıldığında çok iyi özellikler sergileyerek sürdürülebilir ve etkili bir alternatif sunmuştur. Ayrıca akustik özellikleri incelendiğinde de gürültüyü azaltma ve kontrol etmede etkili olduğunu göstermiştir. Bu tür bir biyokompozit, özellikle biyopolimer matris (sodyum aljinat) ve doğal takviye lifleri (kenevir) arasındaki etkileşimden faydalanır.

Tablo 2. Kullanılan numunelerin içerikleri (Figueiredo et al., 2025).

Kompozisyon	S01		S02		S03		S04		S05	
	W (g)	%	W (g)	%	W (g)	%	W (g)	%	W (g)	%
Hindistan cevizi lifi	80.0	21.9	80.0	23.8	80.0	28.0	80.0	21.5	80.0	21.2
Sodyum aljinat	5.0	1.4	5.0	1.5	5.0	1.7	10.0	2.7	15.0	4.0
Kalsiyum sülfat	0,9	0.2	0,9	0.3	0,9	0.3	1.8	0,5	2.7	0.7
Sodyum sitrat	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.2	0.1	0.3	0.1
su	280.0	76,5	250.0	74.4	200.0	69.9	280.0	75.3	280.0	74.1
Toplam	366.0	100.0	336.0	100.0	286.0	100.0	372.0	100.0	378.0	100.0

Sodyum Aljinatın Özellikleri; deniz yosunlarından elde edilen doğal bir polisakkarittir. Avantajları arasında; biyobozunur ve toksik olmayan bir malzemedir. Jelleşme özelliği sayesinde lifleri kapsülleyebilir ve su bazlı işlenebilir. Zayıf yönleri ise; saf formda düşük mekanik dayanım ve nem karşısında şişme eğilimi gösterebilir (Tezcan, 2008).

Kenevir Liflerinin Rolü; Kenevir hurda ve liften oluşur. Hurdası, kireçle karıştırılarak hempcrete (kenevir betonu) yapılır. Lifi ise doğal reçinelerle takviye edilerek lif paneller ve kompozit plakalar üretilebilir. Kenevir liflerinin avantajları; yüksek gerilme direnci (550–1110 MPa). Düşük maliyetli olması önemlidir. Lif yüzeyinde doğal selüloz yapısı sayesinde biyopolimerlerle iyi adezyon sağlar. Yalıtım ve takviye özellikleri sağlar. Olası problemler ise; hidrofilik yapı nedeniyle nem tutma eğilimi. Alkali veya su bazlı ortamda şişme riskinin olduğunu belirtmişlerdir (Melek Demirbek & Oktav Bulut, 2021), (Brzyski et al., 2017) (Acar et al., 2025). Şekil 4'te kenevir yalıtım malzemesi ve kenevir tuğla görsellerine yer verilmiştir(Acar et al., 2025)

- Bu çalışmada önerilen kenevir bitkisi;

1. Kenevir liflerinden elde edilen plakalar veya şilteler, ısı ve ses yalıtımında kullanılabilir.

2. Kenevir betonu (hempcrete) elde edilerek taşıyıcı olmayan bloklar üretilebilir.

3. Cam yünü ve taş yünü gibi klasik yalıtım malzemelerine çevre dostu alternatif olarak görülür.

4. Kenevir lifleri, biyopolimerlerle birleştirilerek iç cephe kaplamaları, mobilya ve yapı elemanlarında kullanılır.



Şekil 4. Kenevir yalıtım malzemesi ve kenevir tuğla (Acar et al., 2025)

Kenevir esaslı levhalar, aşağıdaki alternatif kullanım alanlarında değerlendirilebilir:

1. Isı yalıtım levhası olarak: Dış duvarlarda ve çatılarda, özellikle mertek aralarına ya da çatı altı döşeme yüzeylerine doğrudan uygulanarak, cam veya taş yünü gibi geleneksel yalıtım malzemelerine çevre dostu bir alternatif sunabilir.

2. Kaplama panelleri olarak: Kenevirin hidrofilik (su emici) özelliği uygun işlemlerle giderildiği takdirde hem iç hem de dış duvarlarda OSB benzeri kaplama panelleri olarak kullanılabilir.

Kenevir Kullanımda Öne Çıkan Ülkeler (Brzyski et al., 2017):

- **Fransa**: Dünyanın en büyük endüstriyel kenevir üreticilerindendir. Kenevir betonla yapılan ev sayısı artmaktadır.
- **Almanya**: Kenevir esaslı yalıtım malzemeleri yaygındır.
- **Hollanda ve İngiltere**: Kenevirle yapılan sürdürülebilir konut projeleri vardır.
- **ABD ve Kanada**: 2018 sonrası kenevir yasallaştı; yapı sektöründe kullanımı hızla artmaktadır.

2.3. Kenevir ve ahşap levhalar ile ilgili uygulamalar

Ağaç kabuğu ve kenevir atıklarının kullanıldığı yalıtım levhalarının termal özellikleri üzerine yapılan bir araştırmada, iki farklı atık malzemenin çeşitli oranlarda ve farklı tutkal türleri ile birleştirilerek yalıtım levhası üretimi değerlendirilmiştir. Bu levhaların termal iletkenlik (λ) değerleri ölçülmüş olup, işleme yöntemlerinin yoğunluk değişimlerine (düşük ve orta yoğunluk) bağlı olarak levhaların termal özelliklerinde farklılıklar gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgular, yerel atık malzemelerin, geleneksel ticari yalıtım ürünlerine kıyasla rekabetçi termal iletkenlik değerlerine sahip, çevre dostu ve düşük maliyetli bir alternatif yalıtım malzemesi olarak kullanılabilirliğini desteklemektedir (Ninikas et al., 2019).

Isıl iletkenliğin, malzemenin kalınlığından bağımsız olduğu yaygın bir kabul olmakla birlikte, yapılan çeşitli araştırmalar, kalınlık oranının artışının ısıl iletkenliğin kalınlığa bağlı hale gelmesine neden olabileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca, malzemenin yapısı, bileşenlerinin özellikleri, üretim teknolojisi ve kullanılan bağlayıcı türleri, elde edilen bağın dayanıklılığını ve güçlülüğünü etkileyebilmektedir. Bu bağlamda, test edilen üretim yöntemlerinin de ısıl iletkenlik üzerinde önemli etkiler oluşturduğunun altı çizilmelidir. Geleneksel yalıtım malzemeleri ile karşılaştırıldığında (örneğin, mineral yün: 0,033-0,055 W/m·K, sert ağaç: 0,16 W/m·K, yumuşak ağaç kereste: 0,12 W/m·K, yün keçe: 0,07 W/m·K, odun lifli yalıtım levhaları: 0,04-0,06 W/m·K), geliştirilmiş levhaların ısıl iletkenlik katsayısının (λ) 0,16 ile 0,035 W/m·K arasında değiştiği dikkate alındığında, kenevir samanı gibi doğal malzemelerden elde edilen levhaların, gerekli ısıl iletkenlik değerlerine karşılık geldiği gözlemlenmiştir. Prototip bir üretim teknolojisinin geliştirilmesiyle, bağlayıcı tüketimi ve dağılımının hassas bir şekilde kontrol edilmesi suretiyle, ısıl iletkenliğin daha da azaltılması mümkün olacaktır (Kirilovs et al., 2015).

Doğranmış ve nemli korunmuş kenevir, gövde, yaprak ve tohum dahil olmak üzere tüm parçaların kullanılmasını sağlar, bu da malzemenin hava koşullarından bağımsız depolanmasına, işleme sürelerinin kısalmasına ve enerji tüketiminin azalmasına olanak tanır. 8 mm kalınlığındaki PF (Phenolformaldehyde resins)

bağlayıcıyla yapılan levhalar, yüksek yoğunluk ve dayanım gösterse de, termal iletkenlikleri artmıştır. 16 mm kalınlığındaki levhalar ise, düşük termal iletkenlikleriyle ses ve ısı yalıtımında kullanılabilir (Kirilovs et al., 2014).

Yonga levha üretiminde ahşabın yerine %10 ve %25 oranında kenevir yongası kullanılarak 650 kg/m³ yoğunluğunda 7 farklı panel üretilmiştir. Sonuçlar, kenevir yongalarının, geleneksel yonga levhalara göre daha düşük yoğunluk ve benzer mekanik özellikler sunduğunu göstermektedir. %25 kenevir yongası içeren levhalar, endüstriyel odun parçacıklarına göre daha düşük şişme değerleri gösterirken, kenevir yongalarının levhaların nem direncini artırdığı ve kalınlık şişmesini azalttığı gözlemlenmiştir. Bu bulgular, kenevir yongalarının yonga levha üretiminde sürdürülebilir bir alternatif olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Şekil 5'de üretilen numunelere ait görsellere yer verilmiştir (Auriga et al., 2022).



Şekil 5. Üretilen yonga levha tiplerinin kesit görselleri. Tipler, A ile G arasındaki harflerle tanımlanmıştır (Auriga et al., 2022).

Ahşap taşıyıcı çerçeve bir sistem ve kenevir dolgulu duvarların olduğu **hibrit bir sistem** oluşturulabilir Ahşap yapılar ile ilgili tasarımlar ve uygulamalar yapabilmek için Türkiye'de uygulanan yönetmelik ve standartları incelemek gerekirse;

2.4. Türkiye'de ahşap binaların tasarım, hesap ve yapım esaslarına dair yönetmelik

Kapsam: Taşıyıcı ahşap yapı elemanlarına sahip yapılar ile karma sistemli ahşap binalar

Amaç: Ahşap yapıların güvenli bir biçimde tasarlanması, hesaplanması ve inşa edilmesi için kurallar belirlemek

Yönetmelikte yer alan temel başlıklar; (https://www.hakedis.org/ahsap-binalarin-tasarim-hesap-ve-yapim-esaslarina-dair-yonetmelik-yayimlandi/?utm_source=chatgpt.com):

1. Genel Hükümler
2. Malzeme (ağaç türleri, sertifikasyon vs.)

3. Yapısal Modelleme, Analiz & Hesaplama

4. Dayanım Tasarımı

5. Kullanılabilirlik Sınır Durumu

6. Yangına Karşı Tasarım

7. Yalıtım Tasarımı

Yönetmelikteki uygulama esasları; (https://csb.gov.tr/ahsap-yapilar-yonetmeligi-yururluge-giriyor-bakanlik-faaliyetleri-40441?utm_source=chatgpt.com)

1. Malzeme Standardı

- Yapı Malzemeleri Yönetmeliği (AB 305/2011) ve benzeri mevzuatlara uygun sertifikalı malzeme kullanımı zorunludur (https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2013/07/20130710-10.htm).

2. Deprem Dayanımı

- Deprem bölgelerinde yapılan karma (ahşap taşıyıcılı) binalarda hem bu yönetmeliğin hem de Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği kurallarına uyulması gerekmektedir.

3. Yangın Tasarımı

- Yangına karşı tasarım kapsamında, ayrıca Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik esaslarına da riayet edilmelidir.

4. Diğer Yapım Kuralları

- Bacalar ve tesisat boruları dış duvarlar üzerinde yer almamalıdır, gerekirse yalıtım önlemleri alınmalıdır.

2.5. Türkiye'de ahşap yapılar ve malzemeleri için kullanılan bazı standartlar

TS EN 1995-1-1: Ahşap yapıların projelendirilmesi bölüm 1-1: Genel kurallar ve bina kuralları

TS EN 338: Yapı Kerestesi Mukavemet Sınıfları

TS EN 1912: Yapı Kerestesi Mukavemet Sınıfları- Görünüşe ve Ağaç Türlerine Göre Tasnif

TS EN 14080: Ahşap Yapılar Tutkallı Lamine Kereste ve Tutkallı Masif Ahşap Özellikler

TS EN 383: Yapı Keresteleri Deney Metotları- Dübel Tipi Bağlayıcıların Temel Değerleri ve Gömülme Mukavemetinin Tayini

TS EN 301: Yapıştırıcılar- Fenolik ve Amino Plastik- Yük Taşıyıcı Ahşap Yapılar İçin Sınıflandırma ve Performans Özellikleri

TS EN 15425: Yapıştırıcılar- Yük Taşıyıcı Kereste Yapılar İçin Sınıflandırma ve Performans Özellikleri

TS EN 409: Yapı Keresteleri Deney Metotları- Dübel Tipi Bağlayıcıların Eğilme Momentinin Tayini

TS EN 594: Ahşap Yapılar- Deney Yöntemleri- Ahşap Çerçeveli Duvar Levhalarının Düzlemlerine Paralel Yüklere Karşı Dayanıklılığı ve Sağlamlığı

TS 64-2 EN 622-2: Lif levhalar- Özellikler- Bölüm 2: Sert Levhaların Özellikleri

TS 64-3 EN 622-3: Lif levhalar- Özellikler- Bölüm 3: Orta Sert Levhaların Özellikleri

TS EN 622-5: Lif levhalar- Özellikler- Bölüm 5: Kuru İşlemli Levhalar (MDF) İçin Gerekler

TS EN 636+A1: Kontrplak- Özellikler

TS EN 312: Yonga levhalar- Özellikler

TS EN 300: Yönlendirilmiş Lif Levhalar (OSB)- Tarifler, Sınıflandırma ve Özellikler

TS EN 16351: Ahşap Yapılar- Çapraz Tabakalanmış Ahşap Levha

TS EN 912: Ahşap Bağlayıcılar Ahşap Bağlayıcıların Özellikleri

TS EN 1075: Ahşap Yapılar Deney Metotları- Delikli Metal Lavha Bağlayıcılar ile Yapılan Birleştirmeler

TS EN 1380: Ahşap Yapılar Deney Yöntemleri- Yük Taşıyıcı Çiviler, Vidalar, Dübeller ve Cıvatalar

TS EN 1380: Ahşap Yapılar Deney Yöntemleri- Kanca Kullanılarak Yapılmış Yük Taşıyıcı Birleştirmeler

TS EN 15425: Yapıştırıcılar- Yük Taşıyan Kereste Yapılar İçin Tek Bileşenli Poliüretan- Sınıflandırma ve Performans Özellikleri

TS EN 384+A2: Yapı Kerestesi- Mekanik Özellikler ve Yoğunluğunun Karakteristik Değerlerinin Tayini

TS EN 408+A1: Ahşap Yapılar- Yapı Kerestesi ve Yapıştırılmış Lamine Kereste- Bazı Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Tayini

TS EN 14545: Ahşap Yapılar- Bağlayıcılar- Gerekler

TS EN 14358: Ahşap Yapılar- Karakteristik Değerlerin ve Kabul Kriterlerinin Hesaplanması

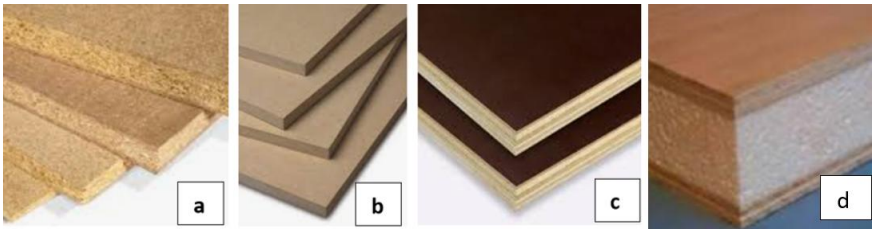
TS EN 13986+A1: Yapılarda Kullanılan Ahşap Esaslı Levhalar

TS EN 1383: Ahşap Yapılar- Deney Yöntemleri- Ahşap Elemanların, Ahşap Bağlayıcıların Çekme Kuvvetine Karşı Direnci

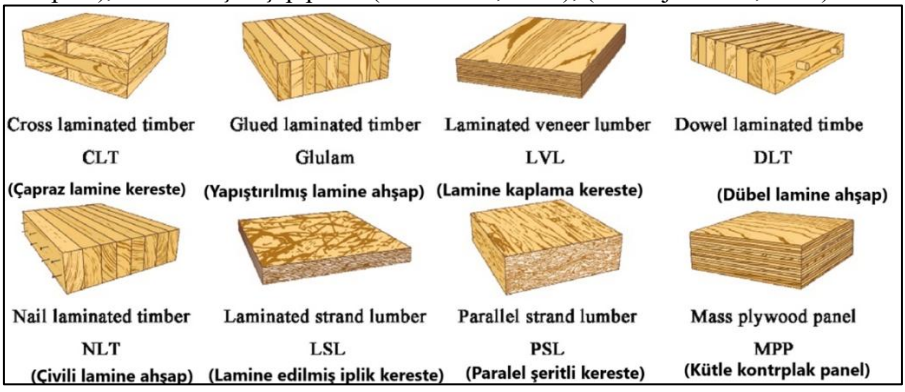
2.6. Ahşap yapılar ile ilgili örnek çalışmalar

Betonarme yapıların yüksek karbon ayak izi, su tüketimi ve atık miktarları nedeniyle çevresel açıdan olumsuz etkiler yarattığı; buna karşın ahşap yapıların daha düşük karbon salımı, karbon tutma kapasitesi, geri dönüştürülebilirlik gibi çevreci özellikleriyle öne çıktığı belirtilmiştir. Türkiye'de kentleşme süreçlerinin büyük ölçüde betonarme yapılaşma üzerine kurulması, yapı ruhsatlarında %90 oranında betonarme tercihini beraberinde getirmiş ve bu durum sürdürülebilir kent politikalarını olumsuz yönde etkilemiştir. Buna karşılık, ABD, Kanada, Norveç ve Almanya gibi ülkelerde modüler, prefabrike ve çapraz lamine ahşap (CLT) sistemlerinin yaygınlaştığı ve kent merkezlerinde bile bu çevreci yapı çözümlerinin tercih edildiği görülmektedir (Gün & Anıktar, 2021)

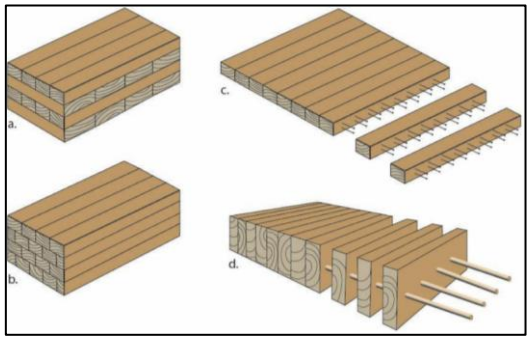
Ahşap esaslı kompozitler, ahşabın doğal veya sentetik bağlayıcılar kullanarak birleştirilmesiyle elde edilen, düşük kaliteli odunların ve endüstriyel atıkların değerlendirilmesini sağlayan, yüksek performanslı, boyutsal olarak kararlı ve işlenmesi kolay malzemelerdir. Bu kompozitler, yapısal ya da yapısal olmayan amaçlara göre sınıflandırılabilir. Tablo 3'de bu kompozitlere yer verilmiştir (Melek Demirbek & Oktav Bulut, 2021), (Abed et al., 2022). Şekil 6, 7 ve 8'de bazı ahşap kompozitlerin şekillerine yer verilmiştir (Duan et al., 2022), (Maharjan et al., 2025).



Şekil 6. Ahşap esaslı kompozitler; a. Yonga levha (OSB), b. Lif levha (MDF), c. Plywood (Kontrplak), d. Sandviç ahşap panel (Duan et al., 2022), (Maharjan et al., 2025).



Şekil 7. Ahşap esaslı kompozitler (Duan et al., 2022), (Maharjan et al., 2025).



Şekil 8. Ahşap esaslı kompozitlerin kesitlerinden görünüm: (a) CLT; (b) Glulam; (c) NLT; (d) DLT . (Duan et al., 2022), (Maharjan et al., 2025).

Tablo 3. Ahşap Esaslı Kompozitler ve Özellikleri (Melek Demirbek & Oktav Bulut, 2021), (Abed et al., 2022)

Kompozit Türü	**Açıklama**	**Özellikler**
Yonga Levha (OSB, Sunta)	Odun yongalarının tutkal ve basınçla levha hâline getirilmesi	Ucuz, taşıyıcı değil, dekoratif veya kaplama amaçlı kullanılır
Lif Levha (MDF, HDF)	İnce odun liflerinin reçineyle preslenmesiyle elde edilir	Yüzeyi düzgün, işlenmesi kolay, mobilya ve iç mimaride yaygın
Plywood (Kontrplak)	Ahşap katmanlarının lif yönleri çapraz yapıştırılarak oluşturulması	Hafif, dayanıklı, bazı yapısal uygulamalarda kullanılabilir
Lamine Ahşap (Glulam)	İnce ahşap katmanlarının yapıştırılmasıyla oluşan taşıyıcı elemanlar	Yük taşıyabilir, uzun açıklık geçebilir, eğrisel formlar üretilebilir
LVL (Laminated Veneer Lumber)	İnce kaplamaların lif yönü aynı olacak şekilde yapıştırılması	Yüksek taşıma kapasitesi, kiriş ve kolon gibi taşıyıcı elemanlarda kullanılır
CLT (Cross-Laminated Timber)	Masif tahta katmanlarının lif yönleri çapraz gelecek şekilde yapıştırılması	İki yönlü yük taşıma, yapısal panel, prefabrik kullanıma uygun, çevreci
Sandviç Ahşap Panel	Dış yüzeyde kontrplak/MDF, içte hafif dolgu (örn. köpük)	Hafif, yalıtımlı, yapı kabuğu ve panel kaplama sistemlerinde kullanılır
NLT (Nail-Laminated Timber)	Masif tahtaların çiviyle birleştirilmesiyle oluşan paneller	Geleneksel teknik, döşeme ve çatı panellerinde yapısal taşıyıcı olarak kullanılır
DLT (Dowel-Laminated Timber)	Ahşap lamellerin metal yerine ahşap takozlarla birbirine sabitlenmesi	Tümüyle ahşap, metal içermeyen çevreci yapı elemanı, estetik ve modüler
PSL (Parallel Strand Lumber)	Uzun odun şeritlerinin paralel olarak yapıştırılması	Çok yüksek dayanım, genellikle kolon ve büyük açıklıklı elemanlarda kullanılır

LSL (Laminated Strand Lumber)	Kısa odun liflerinin preslenerek yoğun levhalar haline getirilmesi	Yüksek mukavemet, stabilite; kapı pervazı, kiriş, kolon gibi alanlarda

2.7. Kenevirin Uygulama Sürecinde Karşılaşılan Zorluklar ve Sunulan Olanaklar

Zorluklar:

- Yapı sektöründe endüstriyel kenevirin kullanımına yönelik işleme altyapısının henüz yeterince gelişmemiş olması,
- Kenevir temelli yapı malzemelerine dair standartların ve yasal düzenlemelerin eksikliği,
- Malzemenin maliyet-etkinlik değerlendirmelerinin yaygın olarak yapılmaması,
- Tasarım ve uygulama aşamalarında, özellikle mimar ve mühendisler arasında bilgi eksikliğinin bulunması.

Fırsatlar:

- Yerli üretim yoluyla tarım ve orman sektörlerinde yeni ekonomik fırsatlar yaratma potansiyeli,
- LEED, BREEAM gibi uluslararası çevre dostu yapı sertifikalarıyla uyum sağlayabilmesi,
- Kırsal yerleşimler, ekoköyler ve modüler konut sistemleri için sürdürülebilir bir malzeme alternatifi sunması,
- Afet sonrası acil barınma çözümlerinde, hızlı kurulumu ve nefes alabilen yapısıyla çevreci bir seçenek oluşturması.

3. Sonuç ve Öneriler

Yapı sektöründe sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda, doğal kaynaklı ve düşük karbon salınımlı malzemelerin kullanımı giderek önem kazanmaktadır. Bu kapsamda, biyokompozit yapı malzemeleri özellikle kenevir lifi ve ahşap esaslı türevler, çevre dostu, geri dönüştürülebilir ve enerji verimli alternatifler olarak öne çıkmaktadır. Ahşap yapıların taşıyıcı sistemlerde kullanılmasının yanı sıra, ısı ve ses yalıtımı gibi yardımcı yapı elemanlarında da biyopolimer matrisli (örneğin sodyum aljinat) kenevir lifli panellerin kullanımı, çevresel performans ve malzeme verimliliği açısından umut verici sonuçlar sunmaktadır. Bu tür biyokompozitlerin, geleneksel mineral yünlerine kıyasla benzer ya da üstün performans göstermesi, yapı sektöründe dönüşümün mümkün olduğunu göstermektedir.

Türkiye özelinde ise, ahşap yapı kullanımının hâlâ oldukça düşük seviyelerde olması (yaklaşık %1) ve kentleşmenin betonarme ekseninde şekillenmiş olması,

bu sürdürülebilir malzemelerin yaygınlaşmasını sınırlamaktadır. Ancak geliştirilen yeni yönetmelikler, standardizasyon çalışmaları ve uluslararası örneklerin artması, ahşap esaslı kompozitlerin yapı sektöründe daha fazla yer bulmasına olanak tanıyabilir. Biyokompozit yapı malzemeleri, sadece çevresel fayda sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda yerel tarım ürünlerinin ve atıklarının değerlendirilmesi yoluyla ekonomik ve toplumsal katkılar da sunma potansiyeline sahiptir.

KAYNAKLAR

Abed, J., Rayburg, S., Rodwell, J., & Neave, M. (2022). A Review of the Performance and Benefits of Mass Timber as an Alternative to Concrete and Steel for Improving the Sustainability of Structures. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 14, Issue 9). MDPI. https://doi.org/10.3390/su14095570

Acar, M., Yiğen, Ç., Şahin, M., & Aytaç, S. (2025). *Kenevir Tarımı ve Mevzuatı*.

Ahmad, H., Chhipi-Shrestha, G., Hewage, K., & Sadiq, R. (2022). A Comprehensive Review on Construction Applications and Life Cycle Sustainability of Natural Fiber Biocomposites. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 14, Issue 23). MDPI. https://doi.org/10.3390/su142315905

Akkan Çavdar, A., & Lakot Alemdağ, E. (2024). *Ahşap Yapılarda Enerji Verimli Yalıtım Uygulamaları*. Duvar Yayınları. https://www.researchgate.net/publication/387754767

Auriga, R., Pędzik, M., Mrozowski, R., & Rogoziński, T. (2022). Hemp Shives as a Raw Material for the Production of Particleboards. *Polymers*, *14*(23). https://doi.org/10.3390/polym14235308

Bawono, N. M. H., Bawono, B., Anggoro, P. W., & Jamari, J. (2025). Study of application of coconut coir fiber-based wood-based panels: A literature review. In *Composites Part C: Open Access* (Vol. 17). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2025.100588

Brzyski, P., Barnat-Hunek, D., Suchorab, Z., & Lagód, G. (2017). Composite materials based on hemp and flax for low-energy buildings. *Materials*, *10*(5), 510. https://doi.org/10.3390/ma10050510

Devrim, B. (2023). *Mimarlıkta Biyomalzeme Kullanımının Sürdürülebilirlik Üzerine Değerlendirilmesi*. Fen Bilimleri Enstitüsü.

Duan, Z., Huang, Q., & Zhang, Q. (2022). Life cycle assessment of mass timber construction: A review. In *Building and Environment* (Vol. 221). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109320

Figueiredo, A., Vela, G., Ascensão, G., Vettorazzi, E., Vicente, R., & Oliveira, M. (2025). Development of an innovative biocomposite using coconut fibres and bio-based binder for thermal and acoustic aplications in buildings. *Journal of Cleaner Production*, *491*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144834

Gençer Funda, Y. İ. (2024). Kırklareli Geleneksel Konutlarında Kullanılan Malzemeler ve Yeniden Temin Olanakları. *Journal of Humanities and Tourism Research*, *14(3)*(3), 451–468.

Göre, M., & Kurt, O. (2021). Bitkisel Üretimde Yeni Bir Trend: Kenevir. *International Journal of Life Sciences and Biotechnology*, *4*(1), 138–157. https://doi.org/10.38001/ijlsb.789970

Gün, B., & Anıktar, S. (2021). Çevre ve Şehircilik Uygulamalarında Betonarme-Ahşap Yapı Karşılaştırması. *İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *2*(3), 19–25. https://doi.org/10.47769/izufbed.801787

İbrahim Yıldırımçakar, İ. Y. S. (2022). Küresel Ölçekte Meydana Gelen İklim Krizinin Doğal Kaynaklar Üzerindeki Etkisi: Su Örneği. *Uluslararası Sosyal ve Ekonomik Çalışmalar Dergisi*, *4*, 50–62. http://gsijses.com

Kirilovs, E., Gusovius, H.-J., Kukle, S., & Emsins, J. (2014). Performance of Fibreboards Made from Wetpreserved Hemp. *Materials Science. Textile and Clothing Technology*, *8*(8), 65. https://doi.org/10.7250/mstct.2013.011

Kirilovs, E., Kukle, S., Beļakova, D., Borodiņecs, A., Ruciņš, Ā., & Stramkale, V. (2015). Thermal conductivity of hemp based boards. *Vide. Tehnologija. Resursi - Environment, Technology, Resources*, *1*, 61–66. https://doi.org/10.17770/etr2015vol1.206

Lakot Alemdağ, E., Şahin, B., & Akkan, A. (2023). Geleneksel Konutların Restorasyon Sürecinde Enerji Etkin İyileştirilmesi: Trabzon Evi Örneği. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, *13*(1), 202–222. https://doi.org/10.31466/kfbd.1229963

Liang, R., Zheng, X., Wang, P. H., Liang, J., & Hu, L. (2023). Research Progress of Carbon-Neutral Design for Buildings. *Energies*, *16*(16). https://doi.org/10.3390/en16165929

Lim, J. X., Ong, T. K., Ng, C. K., Chua, I. W., Lee, Y. B., Yap, Z. Y., & Bakar, R. A. (2021). Development of Particleboard from Green Coconut Waste. *Journal of Physics: Conference Series*, *2120*(1). https://doi.org/10.1088/1742-6596/2120/1/012034

Maharjan, S., Gunawardena, T., & Mendis, P. (2025). Review of Experimental Testing and Fire Performance of Mass Timber Structures. In *Journal of Composites Science* (Vol. 9, Issue 6). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/jcs9060290

Melek Demirbek, D., & Oktav Bulut, M. (2021). Kenevir Liflerinin Eldesi, Özellikleri ve Kompozit Uygulama Alanları. *International Journal of Natural and Applied Sciences JONAS*, *4*(4(2)).

Ninikas, K., Ntalos, G., Hytiris, N., & Skarvelis, M. (2019). Thermal Properties of Insulation Boards Made of Tree Bark & Hemp Residues. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, *1*(24), 71–77. https://doi.org/10.5755/j01.sace.24.1.22125

Platt, S. L., Walker, P., Maskell, D., Shea, A., Bacoup, F., Mahieu, A., Zmamou, H., & Gattin, R. (2023). Sustainable bio & waste resources for thermal insulation of buildings. *Construction and Building Materials*, *366*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130030

Ranjetha, K., Alengaram, U. J., Alnahhal, A. M., Karthick, S., Zurina, W. J. W., & Rao, K. J. (2022). Towards sustainable construction through the application of low carbon footprint products. *Materials Today: Proceedings*, *52*, 873–881. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.275

Ryłko-Polak, I., Komala, W., & Białowiec, A. (2022). The Reuse of Biomass and Industrial Waste in Biocomposite Construction Materials for Decreasing Natural Resource Use and Mitigating the Environmental Impact of the Construction Industry: A Review. In *Materials* (Vol. 15, Issue 12). MDPI. https://doi.org/10.3390/ma15124078

Shelly, D., Lee, S. Y., & Park, S. J. (2025). Hemp fiber and its bio-composites: a comprehensive review part I—characteristics and processing. In *Advanced Composites and Hybrid Materials* (Vol. 8, Issue 3). Springer Science and Business Media B.V. https://doi.org/10.1007/s42114-025-01314-0

Tezcan, F. (2008). *Aljinat/ Kil Biyopolimer Nanokompozit Filmlerin Eldesi ve Karakterizasyonu*. Fen Bilimleri Enstitüsü.

Waje, B. Z. (219 C.E.). *Biyokompozit Yapı Malzemesinin Uygulama Potansiyeli ve Sürdürülebilir Konstrüksiyonlar İçin Dayanımının İyileştirilmesi*. Fen Bilimleri Enstitüsü.

Wang, X., He, M., & Li, Z. (2023). Evaluation of engineering demand parameters for seismic analyses of CLT-glulam hybrid structures. *Engineering Structures*, *296*. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116958

BÖLÜM 20

İnsansız Hava Araçlarında Radar Görünürlüğü

Kerem Ayar[1]
Cihat Aydın[2]

[1] Fırat Üniversitesi, Orcıd: 0009-0000-8014-2399
[2] Prof. Dr., Fırat Üniversitesi, Orcıd: 0000-0001-9997-6326

GİRİŞ

İnsansız hava araçları, son yıllarda havacılık teknolojileri içerisinde en hızlı gelişen ve kullanım alanı en genişleyen platformlardan biri hâline gelmiştir. Başlangıç aşamasında ağırlıklı olarak keşif, gözetleme, istihbarat toplama ve hedef tespiti gibi askerî görevler için geliştirilen bu sistemler, günümüzde sivil, ticari, bilimsel ve güvenlik odaklı pek çok faaliyetin ayrılmaz bir parçası olarak değerlendirilmektedir. Afet yönetimi, tarımsal izleme, altyapı denetimi, lojistik faaliyetler, haberleşme desteği, çevresel gözlem, sınır güvenliği ve kritik tesislerin korunması gibi alanlarda İHA kullanımının yaygınlaşması, bu teknolojilerin yalnızca askerî amaçlı araçlar olarak ele alınamayacağını göstermektedir. İHA sistemlerinin düşük maliyetli yapısı, farklı görev profillerine uyarlanabilmesi, uzaktan kontrol edilebilmesi, otonom hareket kabiliyeti kazanabilmesi ve insan hayatı açısından yüksek risk taşıyan bölgelerde görev yapabilmesi, bu platformların stratejik değerini artırmaktadır (Shakhatreh vd., 2019). Bununla birlikte İHA teknolojisinin yaygınlaşması, hava sahası güvenliği, yetkisiz uçuşların önlenmesi, kritik altyapıların korunması, askerî operasyonlarda hedef tespiti ve düşük görünürlüklü hava araçlarının algılanması gibi yeni teknik problemleri de gündeme taşımaktadır.

İHA'ların tespit edilmesi, izlenmesi ve sınıflandırılmasında kullanılan başlıca algılama sistemlerinden biri radar teknolojisidir. Radar sistemleri, elektromanyetik dalgaları hedefe yönlendirerek hedeften geri dönen yansımaları analiz etmekte ve bu yolla hedefin konumu, menzili, hızı, yönü ve bazı karakteristik özellikleri hakkında bilgi üretmektedir. Radarın olumsuz hava koşullarında çalışabilmesi, gece ve gündüz görev yapabilmesi ve görüş hattının sınırlı olduğu durumlarda dahi hedef algılama kapasitesi taşıması, bu teknolojiyi İHA tespitinde merkezi bir konuma yerleştirmektedir. Buna karşılık radar performansı yalnızca radar sisteminin menzili, frekansı, anten yapısı veya sinyal işleme kapasitesiyle açıklanamamaktadır. Hedefin fiziksel boyutu, geometrik biçimi, yüzey yapısı, üretiminde kullanılan malzemeler, radar dalgasının frekansı, polarizasyonu, geliş açısı, hedefin uçuş irtifası ve çevresel yansıma koşulları da tespit başarısını doğrudan etkilemektedir (Skolnik, 2008). Bu nedenle İHA'ların radar karşısındaki algılanabilirlik düzeyini ifade eden radar görünürlüğü kavramı hem hava savunma sistemleri hem de düşük görünürlüklü hava aracı tasarımı bakımından incelenmesi gereken temel bir konu olarak öne çıkmaktadır.

Radar görünürlüğünün değerlendirilmesinde kullanılan temel ölçütlerden biri radar kesit alanı ya da İngilizce karşılığıyla Radar Cross Section (RCS) değeridir. RCS, bir hedefin radar dalgasını ne ölçüde geri yansıttığını gösteren elektromanyetik bir büyüklük olarak tanımlanmaktadır. Bu değer, hedefin yalnızca dış boyutlarıyla ilişkili bir ölçü değildir. Hedefin geometrik formu, yüzey pürüzlülüğü, malzeme yapısı, radar frekansı, polarizasyon durumu ve

radarın hedefe bakış açısı RCS değerini değiştirebilmektedir (Knott vd., 2004). Bu nedenle aynı İHA, farklı frekans bantlarında, farklı yönlerden veya farklı irtifa ve hareket koşullarında değişen radar görünürlüğü sergileyebilmektedir. Özellikle küçük boyutlu ticari İHA'larda radar kesit alanının düşük olması, radar tabanlı tespit sistemleri açısından güçlük oluşturmaktadır (Ezuma, Funderburk, ve Guvenc, 2020). Küçük hedeflerin zayıf yansıma üretmesi, düşük irtifada arazi yansımalarıyla birlikte algılanması ve çevresel bozucu yankılar arasında kaybolabilmesi, İHA tespitini karmaşık bir teknik problem hâline getirmektedir.

İHA'larda radar görünürlüğü, yalnızca hedefin hangi mesafeden tespit edilebildiğiyle sınırlı bir mesele olarak değerlendirilmemelidir. Bu kavram, hedefin sınıflandırılması, tehdit düzeyinin belirlenmesi ve radar ekranında diğer nesnelerden ayırt edilmesi bakımından da belirleyici bir rol üstlenmektedir. Küçük İHA'ların kuşlar, çevresel yansımalar, sabit yapılar veya düşük radar izine sahip farklı nesnelerle karıştırılabilmesi, yanlış alarm oranlarını artırmakta ve hedef teşhis süreçlerini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle literatürde İHA'ların RCS ölçümleri, mikro-Doppler imzaları ve frekans temelli yansıma özellikleri birlikte ele alınmaktadır (Ezuma vd., 2019; Ezuma vd., 2022). Özellikle döner kanatlı İHA'larda pervane hareketinden kaynaklanan mikro-Doppler etkisi, radar sinyali içinde ayırt edici bir iz oluşturabilmektedir. Buna rağmen düşük irtifa uçuşları, zemin yansımaları, çok yollu yayılım etkileri, zayıf sinyal-gürültü oranı ve hedefin düşük hızlı hareket etmesi, radar sistemlerinin İHA'yı güvenilir biçimde algılamasını ve sınıflandırmasını güçleştirmektedir.

Radar görünürlüğünün azaltılması ise düşük görünürlüklü hava aracı tasarımının temel araştırma alanlarından birini oluşturmaktadır. Radar kesit alanını azaltmaya yönelik yaklaşımlar genel olarak gövde geometrisinin radar dalgalarını kaynağa geri döndürmeyecek biçimde düzenlenmesi, radar soğurucu malzemelerin kullanılması, yüzey süreksizliklerinin azaltılması ve elektromanyetik saçılmanın kontrol altına alınması üzerine kurulmaktadır (Ullah vd., 2024). Bu ilkeler insanlı hava araçlarında uzun süredir uygulanmakla birlikte, küçük ve orta ölçekli İHA'larda farklı mühendislik sınırlamaları ortaya çıkmaktadır. İHA'larda ağırlık, maliyet, enerji verimliliği, görev yükü kapasitesi, üretim kolaylığı ve aerodinamik performans gibi parametreler, radar görünürlüğünü azaltmaya yönelik tasarım kararlarını sınırlandırmaktadır. Bu nedenle İHA platformlarında düşük görünürlük hedefi, yalnızca elektromanyetik açıdan değil, bütüncül bir tasarım problemi olarak ele alınmalıdır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, İHA geometrisinin değiştirilmesi yoluyla radar kesit alanında azalma elde edilebileceğini ve bu yaklaşımın deneysel ölçümlerle desteklenebileceğini göstermektedir (Ünalır vd., 2025).

Bu çalışma, İHA'larda radar görünürlüğü kavramını radar kesit alanı, radar tespit süreçleri ve görünürlüğü azaltma yöntemleri çerçevesinde incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışmanın temel amacı, İHA'ların radar tarafından

algılanmasını etkileyen fiziksel ve elektromanyetik faktörleri açıklamak, RCS kavramının İHA tasarımı ve hava savunma sistemleri açısından taşıdığı değeri ortaya koymak ve literatürdeki güncel yaklaşımları bütüncül biçimde değerlendirmektir. Bu kapsamda çalışma, bir yandan radar sistemleri açısından İHA tespitinin neden güçleştiğini ele almakta, diğer yandan düşük radar görünürlüğüne yönelik tasarım stratejilerinin hangi teknik ilkelere dayandığını açıklamaktadır. Böylece İHA'ların radar görünürlüğü hem algılama teknolojileri hem de hava aracı tasarımı bakımından karşılıklı etkileşim içinde gelişen bir araştırma alanı olarak değerlendirilmektedir.

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINA GENEL BAKIŞ

İnsansız Hava Aracı Tanımı ve Temel Özellikleri



Şekil 3. İnsansız Hava Araçlarının Sınıflandırılması (KARABOĞA, 2022)

İnsansız hava araçları, havacılık teknolojilerinin ulaştığı aşama içerisinde kendine özgü teknik yapısı, kullanım biçimi ve hukuki niteliğiyle ayrı bir araç grubu olarak değerlendirilmektedir. Literatürde bu araçlar için farklı adlandırmaların kullanıldığı görülmektedir. "Robot uçak", "pilotsuz uçak", "uzaktan pilotlu uçak" ve "uçan robot" gibi ifadeler, söz konusu araçların temel işleyiş mantığını açıklamak amacıyla tercih edilmiştir. Uluslararası alanda ise bu araçlar çoğunlukla "drone" ya da "UAV/UAS (Unmanned Aerial Vehicle/Systems)" kavramlarıyla karşılanmaktadır. Bu terminolojik çeşitlilik, İHA kavramının hem teknik hem de işlevsel bakımdan geniş bir kullanım alanına sahip olduğunu göstermektedir (Akkurt, 2014).

Teknik açıdan İHA, uzaktan kumanda, otomatik pilot, seyrüsefer cihazı ya da bilişim sistemi aracılığıyla yönlendirilen, otonom hareket kabiliyetine sahip olan veya yapay zekâ temelli sistemler yoluyla sevk edilen hava araçlarını ifade etmektedir. Bu araçların ayırt edici niteliği, içinde ya da üzerinde herhangi bir insan, pilot, uçuş personeli veya mürettebat bulunmaksızın havalanabilmesi ve havada seyrini sürdürebilmesidir (Akkurt, 2014). Bu yönüyle İHA kavramı, insan unsuru araca fiziksel olarak dâhil edilmeden uçuş faaliyeti gerçekleştiren hava araçlarını kapsayan ortak bir adlandırma niteliği taşımaktadır.

Başka bir tanıma göre İHA, kendi güç sistemine sahip bulunan, faydalı yük taşıyabilen, bu yükün tehlikeli ya da tehlikesiz nitelikte bulunabildiği, otomatik

sistemler ya da uzaktan komuta mekanizmaları aracılığıyla uçurulan pilotsuz hava aracı olarak açıklanmaktadır (Özkan, 2016). Bu tanımda aracın yalnızca havalanma kabiliyeti üzerinde durulmamakta, güç sistemi, yük taşıma yeteneği ve kontrol biçimi de kavramın belirleyici unsurları arasında değerlendirilmektedir. Bu çerçevede İHA, salt uçabilen bir nesne olarak ele alınmamakta, belirli teknik bileşenlerin bir araya gelmesiyle işlev kazanan bir hava aracı niteliği taşımaktadır.

"Drone" kavramının kullanıldığı tanımlarda ise insansız hava araçlarının uzaktan kontrol edilebilen hava aracı sistemleri olduğu belirtilmektedir. Bu sistemler quadcopter, multicopter, farklı büyüklüklerdeki oyuncak nitelikli hava araçları ve askeri amaçlarla kullanılan araçlara kadar uzanan geniş bir kapsam içinde ele alınmaktadır (Chang vd., 2017). Söz konusu çeşitlilik, İHA'ların yalnızca tek tip bir teknolojik ürünü ifade etmediğini, farklı boyut, kapasite ve kullanım amacına göre değişen sistemleri bünyesinde barındırdığını ortaya koymaktadır. Bu nedenle İHA kavramının açıklanmasında yalnızca aracın fiziksel yapısına bakılmamakta, kontrol sistemi, hareket kabiliyeti ve kullanım amacı da dikkate alınmaktadır.

Bazı tanımlarda İHA'nın pilot taşımayan, GPS kontrollü ve otomatik hareket edebilen hava aracı olarak ifade edildiği görülmektedir (Shakhatreh vd., 2019). Bu yaklaşım, kavramın belirli bir yönünü açıklamakla birlikte, İHA'nın bütün unsurlarını kapsayacak genişlikte bir değerlendirme ortaya koymamaktadır. Çünkü İHA niteliğinin belirlenmesinde yalnızca GPS kontrolü ya da otomatik hareket yeteneği yeterli kabul edilmemektedir. Aracın uçuşu sürdürebilecek teknik kapasiteye sahip bulunması, üzerinde pilot taşımaması ve kontrolünün uzaktan ya da otonom operasyon planlaması yoluyla yürütülmesi gerekmektedir. Bu nedenle daha kapsamlı tanımlar, İHA'nın teknik, işlevsel ve hukuki yönlerini birlikte değerlendirmektedir.

Şikago Konvansiyonu'nun 8. maddesi kapsamında pilot bulunmayan araçların İHA olarak tanımlandığı belirtilmektedir. Bu yaklaşım, oldukça geniş bir çerçeve ortaya koymaktadır. Ulusal hukuk bakımından ise İHA kavramının içeriği, 2920 sayılı Türk Sivil Havacılık Kanunu ile Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü tarafından yayımlanan İHA Talimatı hükümleri üzerinden anlaşılmaktadır. 2920 sayılı Türk Sivil Havacılık Kanunu'nun "Tanımlar" başlıklı 3. maddesinin (b) bendinde hava aracı, havalanabilen ve havada seyredebilme kabiliyetine sahip her türlü araç olarak ifade edilmektedir (Özkan, 2016). Bu tanım dikkate alındığında, İHA'ların da havalanabilme ve havada seyredebilme nitelikleri nedeniyle hava aracı kapsamında yer aldığı anlaşılmaktadır.

SHT-İHA'da yer alan tanım, İHA kavramını sistem yaklaşımı içinde ele almaktadır. Buna göre İHA, İHAS'ın bir bileşeni olarak işletilen, aerodinamik kuvvetler aracılığıyla sürekli uçuş yapma yeteneğine sahip bulunan, üzerinde pilot taşımaksızın uzaktan İHA pilotu tarafından kontrol edilen ya da otonom

operasyonu İHA pilotu tarafından planlanarak uçurulan veya havada kalabilen hava aracını ifade etmektedir (Akkurt, 2014). Bu tanım, İHA'nın yalnızca bağımsız bir araç olarak görülmediğini, kontrol istasyonu, komuta ve kontrol veri bağı, kalkış ve iniş sistemi gibi unsurlarla birlikte çalışan daha geniş bir sistemin parçası olarak kabul edildiğini göstermektedir.

SHT-İHA kapsamında İHA pilotu, işletici tarafından uçuşun idaresinden sorumlu olmak üzere görevlendirilen, uçuş süresince aracın hareketlerine ilişkin uçuş kontrollerini yürüten ya da otonom operasyonu planlayan ve takip eden kişi olarak tanımlanmaktadır. İHAS ise İHA ile kontrol istasyonu, komuta ve kontrol veri bağı, kalkış ve iniş sistemi gibi uçuşun gerçekleştirilmesi için gerekli sistem elemanlarının bütünü olarak açıklanmaktadır (Chang vd., 2017). Bu tanımlardan hareketle İHA'nın, yalnızca havada bulunan araçtan ibaret olmadığı, yerdeki kontrol yapıları ve uçuşu destekleyen teknik bağlantılarla birlikte anlam kazandığı anlaşılmaktadır.

Bir hava aracının İHA olarak kabul edilebilmesi için belirli nitelikleri taşıması gerekmektedir. Aracın insansız hava aracı sisteminin bir bileşeni olarak işletilmesi, aerodinamik kuvvetler aracılığıyla sürekli uçuş yapma yeteneğine sahip bulunması, üzerinde ya da içinde pilot taşımaması ve uzaktan İHA pilotu tarafından kontrol edilmesi gerekmektedir. Buna ek olarak, otonom operasyonunun İHA pilotu tarafından planlanarak yürütülmesi ya da aracın havada kalabilme kapasitesine sahip bulunması da temel unsurlar arasında yer almaktadır. Bu özellikler, İHA kavramının teknik sınırlarını belirlemekte ve hangi araçların bu kapsamda değerlendirileceğini ortaya koymaktadır (Shakhatreh vd., 2019).

Doktrinde İHAS bileşenlerinin daha ayrıntılı biçimde açıklandığı görülmektedir. NATO Müttefik Hava Gücü Stratejik Konsepti'ne göre sistemin unsurları arasında faydalı yükleri taşıyan İHA platformu, sensörler, kameralar ve füzelerden oluşan faydalı yükler, sistemi işleten İHA operatöründen bakım personeline kadar uzanan insan unsuru, görevlerin planlanması, koordine edilmesi ve icrasını yürüten kontrol unsuru, sistem içi ve dışı iletişimi gerçekleştiren muhabere sistemleri ile araçlar, teçhizatlar ve yer sisteminden oluşan destek unsuru bulunmaktadır (Özkan, 2016). Bu açıklama, İHA'nın tek başına uçan bir araçtan ziyade çok bileşenli bir sistem mantığıyla işlediğini göstermektedir.



Şekil 4. Bayraktar TB-2 SİHA (BAYKAR Teknoloji | Fotoğraf Galerisi, t.y.)

Sivil nitelikli bir İHA'nın ana unsurları, havalanabilme, havada seyredebilme, insansız yani mürettebatsız yapıda bulunma, sivil nitelik taşıma ve uzaktan ya da otonom operasyon yoluyla İHA pilotu tarafından kontrol edilme biçiminde sıralanmaktadır (Akkurt, 2014). Bu unsurlar birlikte değerlendirildiğinde İHA, insanlı hava araçlarından ayrılan, kontrol ilişkisi yerden ya da önceden planlanan operasyon sisteminden kurulan, teknik bileşenleriyle havacılık faaliyeti yürüten bir araç türü olarak tanımlanmaktadır. Bu nedenle İHA kavramı hem havacılık teknolojisinin gelişimini hem de bu teknolojiye bağlı yeni kontrol ve işletim biçimlerini yansıtan özel bir hava aracı kategorisi olarak kabul edilmektedir.

İnsansız Hava Aracı Kullanım Alanları

İnsansız hava araçları, askeri ve sivil faaliyet alanlarında giderek daha geniş bir işlevsel çerçeveye sahip olan yüksek teknoloji ürünleri arasında yer almaktadır. Bu araçlar, uzaktan kontrol sistemleri ya da önceden belirlenmiş uçuş planları aracılığıyla hareket edebilmekte, farklı görev türlerine uyum gösterebilen teknik donanımlarıyla çok yönlü kullanım imkânı taşımaktadır. Geliştirme ve işletme maliyetlerinin insanlı hava araçlarına kıyasla daha düşük düzeyde bulunması, bu sistemlerin savunma, güvenlik, bilimsel inceleme, afet yönetimi, tarım, medya ve ticaret gibi alanlarda tercih edilmesine zemin hazırlamaktadır. İHA'ların yüksek çözünürlüklü kameralar, gece görüş sistemleri, termal görüntüleme birimleri, uzun süre havada kalabilme kapasitesi, sessiz çalışma niteliği ve radarda daha az iz bırakma özelliği, bu araçların farklı görevlerde etkili biçimde kullanılmasına elverişli bir yapı meydana getirmektedir (Demirkıran, 2010).

İHA'ların askeri kullanım alanlarının başında keşif, taktik keşif, gözetleme ve istihbarat faaliyetleri gelmektedir. Zorlu arazi koşullarında, tehdit düzeyi yüksek bölgelerde ve insan hayatı açısından risk taşıyan alanlarda görev icra edebilmeleri, bu araçların askeri faaliyetlerdeki değerini artırmaktadır. Gözetleme ve keşif görevleri, İHA teknolojisinin gelişimiyle birlikte birbirinden

ayrılması güç bir bütün hâline gelmiştir (Demirkıran, 2010). İHA'lar aracılığıyla hedef tespiti yapılmakta, hareketli unsurlar izlenmekte, operasyon sahasına ilişkin görüntü ve konum bilgileri elde edilmektedir. Bu yönüyle İHA'lar, askeri personelin doğrudan risk altında bulunmasını azaltan ve karar alma süreçlerinde veri temelli değerlendirme yapılmasına katkı veren sistemler olarak kullanılmaktadır.



Şekil 5. Askeri Taktik Mini İHA Sitemleri(STM'nin Taktik Mini İHA Sistemleri Kış Tatbikatı'na Damga Vurdu, 2025)

Bilimsel araştırmalar, İHA'ların kullanıldığı alanlardan bir diğerini oluşturmaktadır. Atmosferik, ekolojik, jeolojik ve meteorolojik incelemelerde bu araçlardan yararlanılmaktadır. Volkan gözlemleri, okyanus araştırmaları ve hava olaylarının izlenmesi gibi çalışma alanlarında İHA'lar, insan hayatını tehlikeye atmadan veri toplanmasına imkân tanımaktadır. Global Hawk İHA'sının 2010 yılında bir fırtınanın üzerine konumlandırılarak fırtınanın gelişimi ve oluşumuna ilişkin verilerin elde edilmesinde kullanılması, bu alandaki örneklerden biri olarak belirtilmektedir. Volkan araştırmalarında mikro İHA'ların kullanımı da dikkat çekmektedir. "Technische Universität Braunschweig" tarafından "Carolo" İHA'sı aracılığıyla Ekvator'daki "Cotopaxi ve El Reventador" aktif yanardağlarının kraterlerinde lav akıntılarının gözlemlendiği ifade edilmektedir. Bu tür görevlerde İHA'lar, uydulara kıyasla daha esnek kullanım, sensör değişimi ve atmosferik veri elde etme bakımından işlevsel bir araç niteliği taşımaktadır (Haider, 2014).

Doğal afet, kaza ve yangınla mücadele süreçlerinde de İHA'lardan yararlanılmaktadır. Fırtına, sel, çığ ve deprem gibi afetler sırasında ya da sonrasında mevcut durumun izlenmesi, zarar gören bölgelerin belirlenmesi ve müdahale gerektiren noktaların tespiti amacıyla İHA sistemleri kullanılmaktadır. Nükleer radyasyon, deniz kazası, uçak kazası ve orman yangını gibi insan

kaynaklı olaylarda da arama kurtarma ve müdahale süreçlerine destek verecek görüntü ve ölçüm verileri elde edilmektedir. Ekim 2007'de Kaliforniya'da yaşanan büyük orman yangınında keşif amacıyla İHA kullanılmış, termal görüntü sensörleriyle alevlerin koordinatları belirlenmiş ve bu koordinatlar yangın söndürme uçaklarına iletilmiştir. Haiti'deki deprem sonrasında Global Hawk İHA'sının felaket alanını incelemek ve yardım faaliyetleri için iniş sahası belirlemek amacıyla kullanıldığı belirtilmektedir. Japonya'daki deprem ve tsunami sonrasında nükleer santralde aşırı ısınan bölgelerin kızılötesi sensörler yardımıyla tespit edilmesi de bu kullanım biçimine örnek teşkil etmektedir (Elmas ve Alkan, 2023).



Şekil 6. Arama ve Kurtarma Görevleri(İHA Kullanım Alanları - Shark Aviation, t.y.)

Kritik tesislerin korunması, İHA'ların sivil güvenlik ve altyapı denetimi kapsamında üstlendiği görevlerden biri olarak değerlendirilmektedir. Doğal gaz ve petrol boru hatları, enerji nakil hatları, deniz ulaşım yolları, karayolları, demiryolları ve havaalanları gibi tesis ve ulaşım ağlarının gözetlenmesinde İHA'lardan yararlanılmaktadır. Hırsızlık, sabotaj, korsanlık, kaza ve sızıntı risklerinin izlenmesi, bu sistemlerin kullanım gerekçeleri arasında yer almaktadır. Enerji hatlarının yalnızca kara unsurlarıyla kontrol edilmesi zaman ve iş gücü kaybına yol açtığından, İHA kullanımı denetim faaliyetlerinin daha hızlı yürütülmesine katkı vermektedir. Deniz ulaşımında korsanlık tehdidinin önceden tespit edilmesi, karayolu ulaşımında trafik yoğunluğu, kaza ve suçluların takibi gibi görevlerde de İHA sistemleri işlevsel biçimde değerlendirilmektedir (Haider, 2014).

Çevresel denetim alanında İHA'lar, hava, su ve deniz kirliliğinin incelenmesi, küresel iklim değişimlerinin izlenmesi, volkanik patlama etkilerinin gözlenmesi ve denize yağ boşaltımı gibi çevreye zarar veren faaliyetlerin belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bu araçlara yerleştirilen görüntüleme sistemleri ve

farklı sensörler aracılığıyla endüstriyel tesislerin atıkları nedeniyle kirlenen su kaynakları tespit edilmektedir. Ormanlarda izinsiz ağaç kesimi, izinsiz balık avlama ve av sezonu dışında yürütülen avcılık faaliyetlerinin belirlenmesinde de İHA sistemlerinden yararlanılmaktadır (Elmas ve Alkan, 2023)



Şekil 7. Çevresel İzleme ve Doğa Koruma(İHA Kullanım Alanları - Shark Aviation, t.y.)

Ziraat ve ormancılık faaliyetleri, İHA kullanımının yaygınlaştığı sivil alanlar arasında yer almaktadır. Tarım ve orman arazilerinin envanterinin çıkarılması, ilaçlama, tohumlama, ekin ve hasat durumunun izlenmesi, istilacı türlerin ve yabancı otların kontrol edilmesi ile vahşi yaşam takibi gibi görevlerde İHA'lardan faydalanılmaktadır. Bu araçlar, geniş alanların kısa sürede gözlemlenmesine ve arazi durumunun görsel veriler üzerinden değerlendirilmesine elverişli bir yapı taşımaktadır (Haider, 2014).

Haberleşme, medya ve ticaret alanlarında da İHA'ların kullanım değeri artmaktadır. Doğal afetlerde telefon hatlarının kesilmesi ya da olimpiyat, fuar ve büyük spor karşılaşmaları gibi etkinliklerde iletişim yoğunluğunun artması durumunda İHA'lar iletişim rölesi olarak kullanılmaktadır. Medya sektöründe son dakika haberlerinin izlenmesi, polis faaliyetlerinin takip edilmesi, belgesel ve seyahat programı çekimleri ile trafik raporlarının hazırlanmasında İHA'lardan yararlanılmaktadır (Elmas ve Alkan, 2023). Ticari alanda ise bina, yol ve köprü ölçümleri, kargo taşımacılığı, reklamcılık, maden arama, balık sürülerinin izlenmesi, hava haritacılığı, hava fotoğrafçılığı ve film çekimi gibi faaliyetler gerçekleştirilmektedir. Bu alanların dışında bomba veya füze içeren hava saldırıları, endirekt atışlar için ileri gözetleyicilik, özel operasyonlar, psikolojik harekât, sınır kontrolü, sağlık ve askeri malzeme ikmali, mayın arama ve imha, gemi tanıma, kaçakçılıkla mücadele, hava radyolink ve röle görevi, muharebe

arama kurtarma, hava durumu verisi toplama ve noktadan noktaya kargo teslimi gibi görevlerde de İHA sistemleri kullanılmaktadır (Demirkıran, 2010)



Şekil 8. Milli İHA'lar Deprem Bölgesinde(Milli İHA'lar Ilk Kez Deprem Bölgesinde - Son Dakika Haberleri, t.y.)

1.1.1. İnsansız Hava Araçlarının Askeri ve Sivil Alanlarda Kullanımı

İnsansız hava araçları, askeri ve sivil faaliyet alanlarında farklı görev ihtiyaçlarına uyarlanabilen teknolojik sistemler arasında yer almaktadır. Bu araçların kullanımı, güvenlik politikaları, kamu hizmetleri, afet yönetimi, tarımsal uygulamalar, kolluk faaliyetleri ve ticari süreçler bakımından giderek daha geniş bir kapsam kazanmaktadır. Askeri alanda İHA'lar keşif, gözetleme, hedef tespiti, nokta saldırısı, muhabere rölesi, elektronik harp, haritacılık, mayın döşeme, psikolojik harp ile kimyasal, biyolojik ve nükleer sistemlerin keşfi gibi görevlerde değerlendirilmektedir. Bu görevlerde insanlı hava araçlarına kıyasla daha düşük risk düzeyiyle hareket edilebilmesi, İHA sistemlerinin operasyonel planlamada tercih edilmesine zemin hazırlamaktadır.

Askeri kullanımda İHA'ların farklı irtifa ve havada kalış sürelerine göre görevlendirildiği görülmektedir. Orta ve yüksek irtifada uzun süre kalabilen İHA'lar geniş alan keşfi, sinyal istihbaratı, alan rölesi ve silahlı saldırı görevlerinde kullanılmaktadır. Taktik sınıftaki İHA'lar ise dar bölge keşfi, anlık görüntü aktarımı, emniyet alma ve gözetleme faaliyetlerinde yer almaktadır. Hava indirme operasyonlarında İHA'ların karadaki ve havadaki birlikler arasında haberleşme bağlantısı kurmak üzere röle işlevi üstlendiği belirtilmektedir (CBO, 2011). Bu kapsamda İHA'lar yalnızca izleme aracı niteliği taşımamakta, haberleşme, elektronik destek ve harekât koordinasyonu açısından da tamamlayıcı bir unsur olarak kullanılmaktadır.

Sınır güvenliği, askeri ve güvenlik temelli İHA kullanımının belirgin alanlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Sınır bölgelerinde yasa dışı geçişlerin, kaçakçılık faaliyetlerinin, terör tehdidi oluşturan hareketliliğin ve gözetlenmesi

gereken arazi kesimlerinin takibi için İHA sistemlerinden yararlanılmaktadır. ABD'de Predator tipi İHA'ların sınır gözetleme faaliyetlerinde kullanıldığı ve kaçak geçişlerin önlenmesine yönelik görevlerde yer aldığı ifade edilmektedir (CBO, 2011). Türkiye'de ise sınır güvenliği terörle mücadele, kaçakçılık ve yasa dışı geçişlerin önlenmesi bağlamında ele alınmakta, farklı İHA türleri güvenlik birimlerinin görev sahalarında kullanılmaktadır.



Şekil 9. TUSAŞ ANKA İHA *(ANKA - TUSAS, t.y.)*

Sivil alanda İHA kullanımı, kamu hizmetleri ve toplumsal ihtiyaçlar çerçevesinde çeşitlenmektedir. Kolluk kuvvetleri tarafından arama kurtarma, rehine olayları, firari takibi, uyuşturucu trafiğinin izlenmesi, suç alanlarının havadan görüntülenmesi ve riskli bölgelerin keşfi gibi görevlerde İHA sistemlerinden yararlanılmaktadır. Bu araçlar, olay yerinin havadan incelenmesi, personelin tehlikeli sahalara doğrudan girmeden bilgi edinmesi ve müdahale süreçlerinin daha kontrollü yürütülmesi açısından işlev kazanmaktadır (McGlynn, 2013). Türkiye'de kolluk birimleri, terörle mücadele faaliyetlerinde farklı sınıflardaki İHA'ları kullanırken iç güvenlik görevlerinde daha küçük sistemlerden de faydalanmaktadır.

Sivil kullanım alanları kolluk faaliyetleriyle sınırlı kalmamakta, tarım, afet yönetimi, doğa olaylarının izlenmesi, sağlık, kargo taşımacılığı ve cankurtaranlık gibi farklı alanlara uzanmaktadır. Tarımsal faaliyetlerde arazi yapısının incelenmesi, toprağın verim durumunun değerlendirilmesi, ürün gelişiminin izlenmesi, havadan ilaçlama ve ekim planlamasına ilişkin verilerin elde edilmesi amacıyla İHA'lar kullanılmaktadır. Büyük yangınların takibi, volkanik hareketlerin incelenmesi, vahşi yaşamın gözlemlenmesi ve çevresel değişimlerin izlenmesi de sivil kullanım örnekleri arasında yer almaktadır. Kargo ve sağlık alanında ise belirli malzemelerin ulaştırılması, acil müdahale gerektiren durumlarda destek verilmesi ve denizde tehlike yaşayan kişilere can simidi

ulaştırılması gibi görevlerde İHA teknolojisinden yararlanılmaktadır (McGlynn, 2013).

	C	W	R	T	L
Mikro Mini	Mikro	0.10	250	1	<10
	Mini	<30	150-300	<2	<10
Taktiksel	Çok Yakın Menzil	150	3000	2-4	10-30
	Yakın Menzil	200	3000	3-6	30-70
	Orta Menzil	150-500	3000-5000	6-10	70-200
	Uzun Menzil	-	3000-5000	6-13	200-500
	Dayanıklı	500-1500	5000-8000	12-24	>500
	Orta İrt.- Uzun Dayanıklı	1000-1500	5000-8000	24-48	>500
Stratejik	Yüksek İrtifa- Uzun Dayanıklı	2500-12500	15000-20000	24-48	>2000
Göreve Özel	Muharip	250	3000-4000	3-4	>2000
	Yem	250	50-5000	<4	0-500
	Stratosferik	-	20000-30000	>48	>2000
	Stratosfer Dışı	-	>30000	-	-

**(C: tür, W: Maksimum kalkış ağırlığı-kg, R: Maksimum irtifa-metre, T: Uçuş süresi- saat, L: Veri iletim menzili-km).*

Şekil 10. İHA'ların (Sivil, Askeri ve Bilimsel ayırt etmeksizin) Sınıflandırılması (Bento, 2008)

2. RADAR TEKNOLOJİSİNİN TEMELLERİ, GELİŞİMİ, MODERN UYGULAMA ALANLARI VE RADAR GÖRÜNÜRLÜĞÜ

2.1. Radar Teknolojisinin Temelleri, Gelişimi ve Modern Uygulama Alanları



Şekil 11. Milli Radar Sistemi(Akarsu, 2024)

Radar teknolojisi, elektromanyetik dalgaların hedef yüzeylerden yansıması ilkesine dayanan aktif algılama sistemleri içinde yer almaktadır. “Radio Detection and Ranging” ifadesinin kısaltması olan radar, gönderilen elektromanyetik enerjinin hedefe ulaştıktan sonra geri dönmesiyle hedefin menzili, yönü, hızı ve fiziksel nitelikleri hakkında bilgi elde edilmesine imkân tanımaktadır. Bu sistemler, görüş hattı dışındaki unsurların belirlenmesinde ve olumsuz hava koşullarında algılama faaliyetinin sürdürülmesinde optik sistemlere göre üstün bir konumda değerlendirilmektedir (Liu vd., 2019).



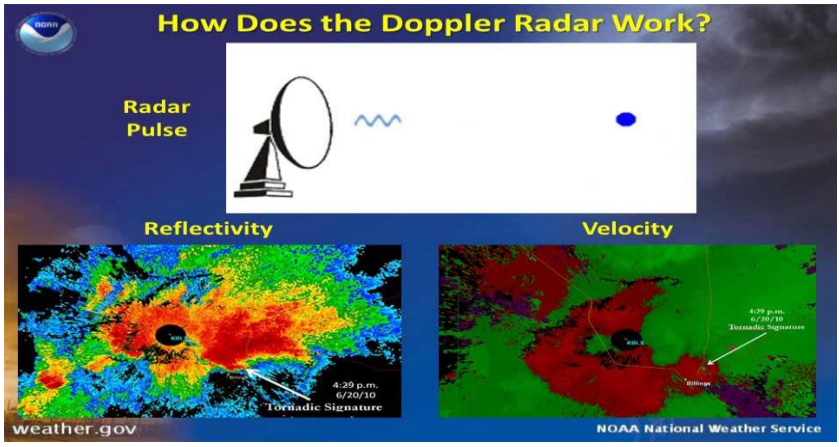
Şekil 12. Radar Tarama Sistemi(Akarsu, 2024)

Radar teknolojisinin kuramsal zemini, 19. yüzyılın sonlarında elektromanyetik dalga teorisinin gelişmesiyle oluşmuştur. James Clerk Maxwell’in elektromanyetik dalga denklemleri ve Heinrich Hertz’in radyo dalgaları üzerine yürüttüğü deneysel çalışmalar, radar sistemlerinin bilimsel temelini meydana getirmiştir. İlk pratik radar uygulamaları 20. yüzyılın ilk dönemlerinde deneysel düzeyde ortaya çıkmıştır. 1930’lu yıllarda daha belirgin bir teknik yapıya kavuşan radarlar, II. Dünya Savaşı sürecinde hava savunması, deniz gözetimi ve erken uyarı görevleri bakımından stratejik bir araç hâline gelmiştir (Kobayashi ve Moriyama, 2020).

Savaş sonrası dönemde mikrodalga elektroniği, yarı iletken devre teknolojileri ve sayısal sinyal işleme alanındaki gelişmeler radar sistemlerinin teknik kapasitesini artırmıştır. Bu ilerlemeler sonucunda daha kompakt, taşınabilir, yüksek hassasiyetli ve farklı frekans bantlarında çalışabilen radar mimarileri geliştirilmiştir. Radar sistemleri bu süreçte askeri kullanımın sınırlarını aşarak sivil havacılık, meteoroloji, deniz trafiği kontrolü ve bilimsel inceleme alanlarında yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır (Patole vd., 2017).

Temel bir radar sistemi verici, duplekser, anten, alıcı, sinyal işleyici ve görüntüleme birimlerinden oluşmaktadır. Verici yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalar üretmekte, anten bu enerjiyi uzaya yönlendirmekte ve hedeften dönen zayıf sinyaller alıcı tarafından toplanmaktadır. Duplekser, aynı antenin hem gönderim hem alım işlevinde kullanılmasını düzenleyerek alıcı devrelerin yüksek güçlü sinyallerden zarar görmesini engellemektedir. Sinyal işleyici, alınan verileri çözümleyerek hedefin mesafesini, hızını, açısını ve karakteristik özelliklerini belirlemektedir. Görüntüleme birimi ise işlenen bilgileri operatörün yorumlayabileceği biçimde aktarmaktadır (Kobayashi ve Moriyama, 2020).

Radar sistemlerinde Doppler etkisi, hareketli hedeflerin hızının ölçülmesinde temel bir prensip olarak kullanılmaktadır. Hedef radara yaklaştığında yansıyan sinyalin frekansı artmakta, uzaklaştığında ise frekans azalmaktadır. Bu frekans kayması, hedefin radyal hızının hesaplanmasına imkân tanımaktadır. Doppler radarlar bu özellikleri nedeniyle hava trafik kontrolü, meteoroloji, otomotiv güvenlik sistemleri ve askeri uygulamalarda kullanılmaktadır (Liu vd., 2019).



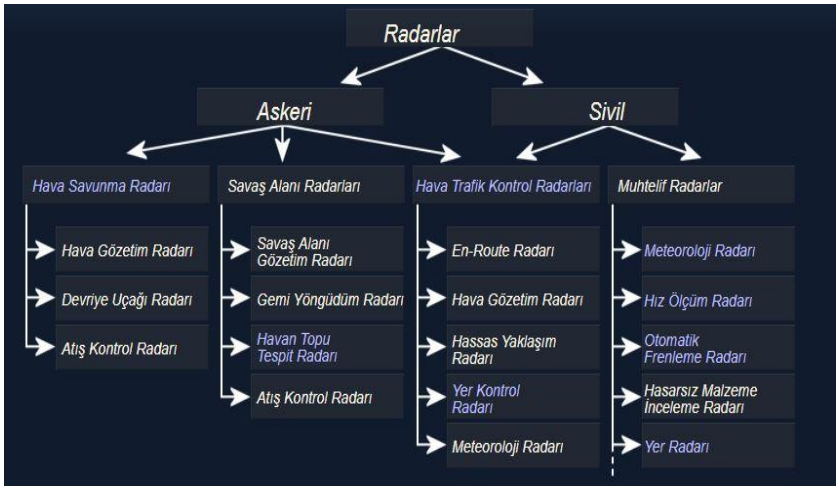
Şekil 13. Doppler Radar(Akarsu, 2024)

Modern radar sistemleri farklı teknik yapılara göre sınıflandırılmaktadır. Darbe radarları, kısa süreli yüksek güçlü darbeler göndererek hedef uzaklığını ölçmektedir. Sürekli dalga radarları, kesintisiz elektromanyetik sinyal kullanarak hareketli hedeflerin hızını belirlemektedir. Frekans modülasyonlu sürekli dalga radarları, gönderilen sinyalin frekansını zaman içinde değiştirerek hem menzil hem hız bilgisini çıkarmaktadır. Bu tür sistemler otomotiv radarlarında yüksek doğruluk, düşük maliyet ve sürekli ölçüm kabiliyeti nedeniyle tercih edilmektedir (Patole vd., 2017).

Sentetik açıklıklı radar sistemleri, hareketli bir platformdan alınan ardışık radar verilerini birleştirerek yüksek çözünürlüklü görüntüler üretmektedir. Bu sistemler uzaktan algılama, haritalama, çevresel izleme ve askeri keşif

görevlerinde kullanılmaktadır. Faz dizili radarlar ise çok sayıda küçük anten elemanından oluşmakta ve ışın yönlendirmesini elektronik biçimde gerçekleştirmektedir. Bu yapı, mekanik hareket gerektirmeden hızlı tarama ve çoklu hedef izleme kabiliyeti kazandırmaktadır (Kobayashi ve Moriyama, 2020).

Günümüzde radar teknolojisi yapay zekâ, derin öğrenme, sensör füzyonu ve kuantum prensipleriyle birlikte yeni bir aşamaya geçmektedir. Yapay zekâ destekli radar sistemleri hedef tespiti, sınıflandırma, gürültü azaltma ve görüntü yorumlama süreçlerinde kullanılmaktadır. Kuantum radar yaklaşımı, düşük sinyal-gürültü oranlarında yüksek hassasiyetli tespit yapma potansiyeliyle savunma uygulamalarında öne çıkmaktadır. Radar teknolojisi günümüzde meteoroloji, denizcilik, hava trafik kontrolü, otomotiv güvenliği, uzay araştırmaları, topografik haritalama, afet yönetimi, çevresel gözlem ve tarımsal izleme gibi geniş bir uygulama alanında kullanılmaktadır (Liu vd., 2019).



Şekil 14. Radarların Sınıflandırılması(Söner, 2020)

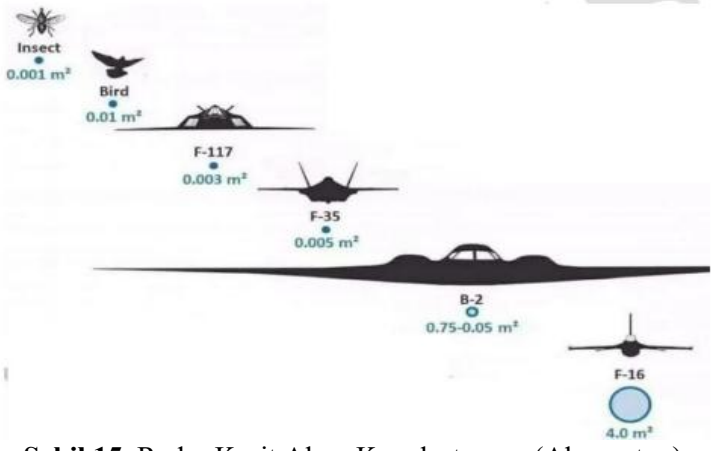
2.2. Radar Görünürlüğü Kavramı

Radar görünürlüğü, bir radar sisteminin belirli bir sahada hedefleri algılayabilme kapasitesini etkileyen temel kavramlardan biri olarak değerlendirilmektedir. Bir radarın azami menzilinden yararlanabilmesi, radar ile hedef arasında algılamayı engelleyen herhangi bir unsurun bulunmamasına bağlıdır. Uygulamada bu koşulun tam anlamıyla karşılanması güçleşmektedir. Dağ, tepe, kaya kütlesi, uçurum, kule ve yüksek yapı gibi doğal ya da insan kaynaklı engeller, radar dalgalarının hedefe ulaşmasını veya hedeften geri dönen sinyalin alıcıya erişmesini sınırlandırmaktadır (Patole vd., 2017).

Radar sahasının seçimi yapılmadan önce görünürlük durumunun değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu değerlendirme, radarın yerleştirileceği konumun hedef algılama bakımından ne ölçüde elverişli olduğunu ortaya koymaktadır. Radar menzil kapsama diyagramı olarak da adlandırılan görünürlük diyagramı, radar kurulumu için uygun saha belirleme sürecinde kullanılan

işlevsel bir araç niteliği taşımaktadır. Bu diyagram, belirli yönlerdeki engellerin radar kapsamasına etkisini göstermekte ve sahanın azami menzil kullanımına ne ölçüde izin verdiğini ortaya çıkarmaktadır.

Radar görünürlüğünün değerlendirilmesinde hedef yüksekliği özel bir yer tutmaktadır. Hava hedeflerinin radar tarafından algılanabilmesi için belirli bir asgari yükseklikte bulunması gerekmektedir. Engel yüksekliği, hedefin uçuş yüksekliğine göre düşük kaldığında radar kapsaması üzerindeki etkisi sınırlı düzeyde kalmaktadır (Duyar ve Selçuk, 2025). Buna karşılık hedefin alçak irtifada seyretmesi durumunda arazi yapısı ve yerel engeller algılama alanını daraltmaktadır. Bu nedenle sabit bir radar konumu için daha yüksek irtifada bulunan hedeflerin kapsama alanı daha geniş biçimde oluşmaktadır.



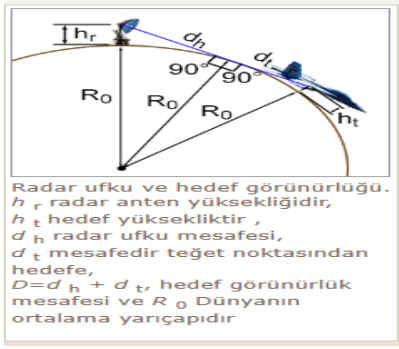
Şekil 15. Radar Kesit Alanı Karşılaştırması(Aksoy, t.y.)

Radar görünürlüğünü belirleyen başlıca unsurlar arasında arazi şekilleri ve yerel engeller bulunmaktadır. Tepeler, kayalık alanlar ve doğal yükseltiler radar dalgalarının doğrusal yayılımını kesintiye uğratmaktadır. İnsan yapımı kuleler, yüksek binalar ve benzeri yapılar da radar sahasında gölgelenme bölgeleri meydana getirmektedir (Duyar ve Selçuk, 2025). Bu engellerin etkisini azaltmak için radar anten yüksekliğinin artırılması ya da daha yüksek kotta bulunan bir kurulum noktasının seçilmesi tercih edilmektedir.

Radar ufku, radar görünürlüğü kavramının anlaşılması bakımından temel bir bileşen oluşturmaktadır. Dünya yüzeyinin eğriliği nedeniyle belirli bir yükseklikte bulunan radarın görüş mesafesi sınırlı kalmaktadır. Görsel ufuk hesabı, sensör yüksekliği ve Dünya yarıçapı dikkate alınarak yapılmaktadır. Radyo dalgalarının atmosfer içinde ilerleyişi ise yalnızca geometrik görüş hattıyla açıklanmamaktadır. Dünya atmosferi radyo dalgalarını belirli ölçüde bükmekte ve bu etki radar ufku hesabında dikkate alınmaktadır. Radar frekansları için Dünya yarıçapının 4/3 oranında büyütülmüş kabul edilmesi, atmosferik

kırılmanın hesaba katılması amacıyla kullanılmaktadır. Böylece radar ufku, görsel ufuktan farklı bir menzil değeriyle ifade edilmektedir. Kırınım olayı da radar görünürlüğünü etkileyen unsurlar arasında yer almaktadır. Radar dalgası bir engelle karşılaştığında dalga enerjisinin bir bölümü engelin çevresinden bükülerek ilerlemektedir (Duyar ve Selçuk, 2025). Bu durum, sinyalin normal görüş hattı yolundan sapmasına neden olmaktadır. Kırınım etkisi, hedef menzilinin doğru değerlendirilmesini güçleştirebilmektedir. Bu etkiyi azaltmak amacıyla engelin üst kısmında yaklaşık 0,5 derecelik bir koruma açısı dikkate alınmaktadır.

Radar görünürlüğünün hesaplanmasında geleneksel yöntemler ve sayısal arazi verisine dayalı yöntemler kullanılmaktadır. Geleneksel yöntemde engel yüksekliği teodolit ile, engel menzili ise harita ya da lazer mesafe ölçer aracılığıyla belirlenmektedir (Patole vd., 2017). Sayısal Yükseklik Arazi Verisi kullanımı ise belirli enlem ve boylamlara ait arazi yükselti bilgileri üzerinden görünürlük hesabı yapılmasına dayanmaktadır. Bu yaklaşım, doğal engeller için sahaya gitmeden değerlendirme yapılmasına, zaman tasarrufuna ve daha düzenli veri kullanımına imkân tanımaktadır.



Şekil 16. Geometrik Model (Radar Horizon ve Hedef Görünürlük Hesaplayıcısı • RF ve Elektronik Hesap Makineleri • Çevrimiçi Birim Dönüştürücüler, t.y.)

3. İHA'LARDA RADAR GÖRÜNÜRLÜĞÜNÜ AZALTMA YÖNTEMLERİ



Şekil 17. RCS Azaltma Yolları(İHA'larda Pasif Stealth: Radar Kesit Alanını (RCS) Azaltma Yolları. - Nanokar Nanoteknoloji, t.y.)

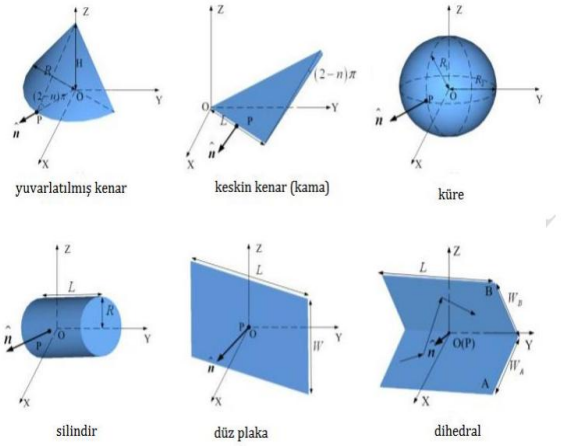
İHA'larda radar görünürlüğünün azaltılması, radar sistemlerinin hedefi algılamasını güçleştiren fiziksel, elektromanyetik ve operasyonel etkenlerin birlikte değerlendirilmesiyle açıklanmaktadır. Pasif radar bağlamında İHA tespiti, hedefin radar kesit alanı, kullanılan dış aydınlatma kaynağının frekansı, sinyal-gürültü oranı, çevresel bozucu yankılar ve hedefin hareket karakteristiği üzerinden şekillenmektedir (Jarabo-Amores vd., 2018). İHA'ların küçük boyutlu yapısı, radar görünürlüğünü etkileyen temel unsurlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Hedef boyutu ile kullanılan sinyalin dalga boyu arasındaki uyum, radar kesit alanının belirlenmesinde belirleyici kabul edilmektedir. Sinyal dalga boyu hedef boyutuna eşit ya da hedef boyutundan daha küçük olduğunda radar kesit alanı artmaktadır. Dalga boyunun hedef boyutuna göre büyümesi durumunda radar kesit alanı belirgin biçimde azalmaktadır (Solomitckii vd., 2018).

Radar görünürlüğünü azaltma bakımından frekans seçimi, İHA'nın algılanabilirliğini doğrudan etkileyen bir unsur olarak değerlendirilmektedir. Milimetre dalga bandı, küçük İHA'ların tespitinde daha yüksek radar kesit alanı oluşturduğu için algılama performansını artırmaktadır. 5G sinyalleriyle yapılan değerlendirmelerde 60 GHz düzeyinde küçük bir İHA'nın radar kesit alanının 2 GHz düzeyine göre çok daha yüksek olduğu gösterilmiştir (Pieraccini vd., 2017). Bu durum, daha düşük frekanslı sinyallerin küçük İHA hedefleri bakımından daha sınırlı yansıma oluşturduğunu göstermektedir. Bu nedenle İHA'nın radar görünürlüğü, radarın kullandığı frekans bandı ve hedefin fiziksel ölçüleri arasındaki ilişkiye bağlı biçimde değişmektedir.

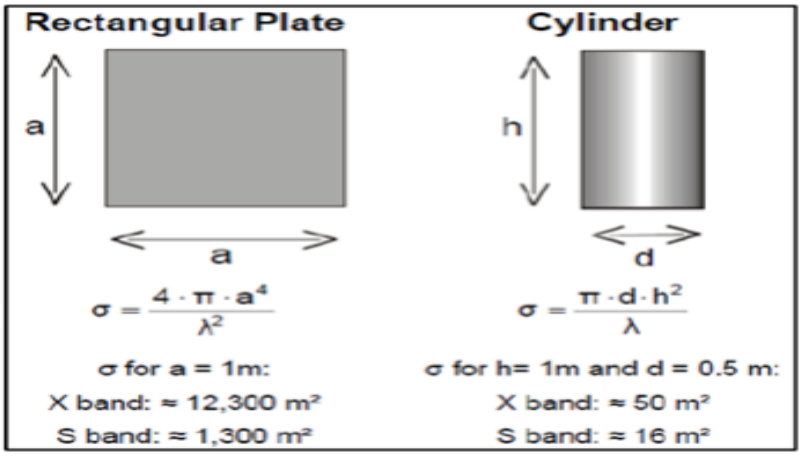
İHA'ların radar görünürlüğünü azaltan bir başka unsur, kullanılan malzemenin yansıtıcılık niteliğiyle ilgilidir. Farklı rotor malzemelerinin pasif radar tespitine etkisi incelendiğinde, karbon fiber kanatlara sahip İHA'larda daha yüksek yansıtıcılık nedeniyle belirgin mikro-Doppler özelliklerinin ortaya çıktığı belirtilmiştir. Bu özellikler, rotor dönüş hızının hesaplanmasına ve İHA'nın kuş ya da sabit kanatlı hava aracı gibi diğer hedeflerden ayrılmasına imkân vermektedir. Buna karşılık plastik yapıdaki İHA'ların daha zayıf sinyaller ürettiği, buna rağmen tespit edilebildiği ifade edilmiştir (Jarabo-Amores vd., 2018). Bu bulgu, yansıtıcılığı düşük malzeme kullanımının radar görünürlüğünü azaltan bir etken olduğunu ortaya koymaktadır.

Rotor hareketinden kaynaklanan mikro-Doppler izleri, İHA tespitinde ayırt edici bir özellik olarak kullanılmaktadır. Döner kanatların oluşturduğu frekans bileşenleri, radar tarafından hedef sınıflandırmada değerlendirilmektedir. İHA'nın düşük yansıtıcılığa sahip kanat yapısıyla bu mikro-Doppler özelliklerini zayıflatması, pasif radar tespitini güçleştirmektedir. Hedefin radara göre durağan kalması ve mikro-Doppler izlerinin belirgin olmaması durumunda İHA sinyali, sabit nesnelerden kaynaklanan bozucu yankılarla karışmaktadır (Solomitckii vd., 2018). Böyle bir durumda bozucu yankı bastırma algoritmaları, İHA sinyalini

çevresel yansımalarla birlikte bastırabilmektedir (Pieraccini vd., 2017). Bu durum, radar görünürlüğünün azaltılması bakımından hareket karakteristiğinin de etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 18. Temel Kanonik Cisimler (Aksoy et al., t.y.)



Şekil 19. Bazı Kanonik Cisimlerin Örnek Radar Kesit Alanı Değerleri(Aksoy et al., t.y.)

Pasif radar sistemlerinde İHA tespiti, çevrede mevcut bulunan dış elektromanyetik kaynakların kullanılmasıyla yürütülmektedir. Bu sistemler kendi sinyalini yaymadığı için hedefin tespiti, dış aydınlatma kaynaklarının gücüne, bant genişliğine, frekansına ve hedef yansımasına bağlı kalmaktadır. İHA'nın küçük radar kesit alanına sahip olması, pasif radarın hedef sinyalini doğrudan ayırt etmesini zorlaştırmaktadır. Çevresel bozucu yankılar, doğrudan dalgalar ve çok yollu yayılım etkileri, küçük ve yavaş hareket eden İHA sinyallerini örtebilmektedir (Jarabo-Amores vd., 2018). Bu nedenle İHA görünürlüğünün düşmesi, yalnızca hedefin fiziksel yapısından kaynaklanmamakta, radar ortamındaki sinyal ve bozucu yankı ilişkisiyle de bağlantılı bulunmaktadır.

İHA'ların haberleşme sinyali yaymaması da tespit süreçleri açısından dikkate alınan bir başka etmendir. Radyo frekansı tabanlı algılama yöntemleri, İHA ile

kumanda ya da haberleşme sistemi arasındaki sinyalleri inceleyerek tespit yapmaktadır. Önceden programlanmış uçuş rotasını izleyen ve sinyal yaymayan İHA'lara karşı bu yöntemlerin sınırlı kaldığı belirtilmiştir (Pieraccini vd., 2017). Bu nedenle elektromanyetik yayın izinin azaltılması, radar dışı algılama süreçleriyle birlikte değerlendirildiğinde İHA'nın genel görünürlüğünü düşüren bir unsur olarak kabul edilmektedir.

Radar görünürlüğünün azaltılması, İHA'nın küçük fiziksel yapısı, düşük radar kesit alanı, yansıtıcılığı sınırlı malzeme kullanımı, rotor kaynaklı mikro-Doppler izlerinin zayıflatılması, radara göre düşük hareketliliğin korunması ve dış sinyal kaynaklarıyla oluşan bozucu yankı ortamı içinde sinyalin ayırt edilmesinin güçleşmesi üzerinden açıklanmaktadır. Pasif radar açısından bakıldığında, İHA tespitinin başarısı yalnızca radar sisteminin işlem kapasitesine bağlı kalmamakta, hedefin elektromanyetik izi, hareket biçimi ve çevresel sinyal koşullarıyla birlikte belirlenmektedir (Solomitckii vd., 2018).



Şekil 20. NANO Malzemelerin Etkisi(Nano Malzemelerin İHA'ların Ağırlığına Etkisi: Gizlilik vs. Performans - Nanokar Nanoteknoloji, t.y.)

SONUÇLAR

İnsansız hava araçlarında radar görünürlüğü konusu, günümüz havacılık ve savunma teknolojileri bakımından teknik, operasyonel ve stratejik boyutları bulunan çok yönlü bir araştırma alanı hâline gelmiştir. İHA'ların askeri ve sivil kullanım sahalarının genişlemesi, bu platformların yalnızca görev kabiliyetleri bakımından incelenmesini yeterli kılmamakta, radar sistemleri karşısındaki algılanabilirlik düzeylerinin de ayrıntılı biçimde değerlendirilmesini gerektirmektedir. Bu çerçevede radar görünürlüğü, İHA'nın fiziksel boyutu, geometrik formu, üretiminde kullanılan malzeme, radar dalgasının frekansı, hedefe geliş açısı, uçuş irtifası, hareket karakteristiği ve çevresel yansıma koşullarıyla birlikte şekillenmektedir.

Çalışma kapsamında ele alınan bilgiler, İHA'ların radar tarafından algılanmasının yalnızca radar sisteminin teknik kapasitesine bağlı kalmadığını göstermektedir. Radar kesit alanı, hedefin elektromanyetik dalgaları geri yansıtma düzeyini belirleyen temel ölçütlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Küçük boyutlu İHA'larda radar kesit alanının düşük olması, özellikle düşük irtifa uçuşlarında, arazi yansımalarının yoğun olduğu ortamlarda ve zayıf sinyal-gürültü koşullarında tespit sürecini güçleştirmektedir. Bu durum, İHA'ların kuşlar, sabit çevresel yansımalar ya da düşük radar izine sahip diğer nesnelerle karıştırılmasına yol açabilmektedir.

Radar teknolojisinin gelişimi, İHA tespitinde daha yüksek hassasiyetli ve daha gelişmiş işleme yöntemlerinin kullanılmasına zemin hazırlamıştır. Doppler etkisi, mikro-Doppler izleri, sentetik açıklıklı radar sistemleri, faz dizili anten yapıları, pasif radar uygulamaları ve yapay zekâ destekli sinyal işleme teknikleri, İHA tespitinde kullanılan başlıca yaklaşımlar arasında yer almaktadır. Döner kanatlı İHA'larda pervane hareketinden kaynaklanan mikro-Doppler bileşenleri, hedef sınıflandırma açısından ayırt edici veriler üretmektedir. Buna karşılık düşük yansıtıcılığa sahip malzeme kullanımı, rotor izlerinin zayıflaması ve hedefin durağan ya da düşük hızlı hareket etmesi, radar görünürlüğünün azalmasına neden olmaktadır. İHA'larda radar görünürlüğünü azaltma yöntemleri, gövde geometrisinin elektromanyetik saçılmayı kontrol edecek biçimde düzenlenmesi, yansıtıcılığı sınırlı malzemelerin tercih edilmesi, radar kesit alanını düşüren tasarım yaklaşımlarının uygulanması ve elektromanyetik yayın izinin azaltılması üzerinden açıklanmaktadır. Pasif radar açısından değerlendirildiğinde, hedefin görünürlüğü dış aydınlatma kaynaklarının frekansı, bant genişliği, güç yoğunluğu ve çevresel bozucu yankı koşullarıyla yakından ilişkilidir. Bu nedenle İHA radar görünürlüğü, tek bir teknik değişkenle açıklanamayacak kadar karmaşık bir yapı taşımaktadır.

Bu araştırma, İHA'larda radar görünürlüğünün hem tespit sistemleri hem de düşük görünürlüklü platform tasarımı açısından kritik bir inceleme alanı olduğunu ortaya koymaktadır. İHA teknolojilerinin gelişimi sürdükçe radar algılama yöntemleri ile görünürlüğü azaltmaya yönelik tasarım stratejileri arasındaki teknik etkileşim daha belirgin hâle gelmektedir.

Kaynaklar dizini

Akarsu, O. (2024). Radar sistemi nedir? - SavunmaTR. https://www.savunmatr.com/radar-sistemi-nedir/

Akkurt, S. (2014). Türk sivil havacılık mevzuatı ve uluslararası konvansiyonlar kapsamında sivil havayolu ile yolcu taşımacılığından kaynaklanan hukuki sorumluluk (1. bs.). Seçkin Yayınları.

Aksoy, S. (n.d.). Radar Kesit Alanı, RKA (Radar Cross Section, RCS).

Aksoy, S., Cisimleri, T., & Değerleri, R. (n.d.). Radar Kesit Alanı, RKA (Radar Cross Section, RCS).

ANKA- TUSAS. (n.d.). Retrieved June 19, 2026, from https://www.tusas.com/urunler/iha/operatif-stratejik-iha-sistemleri/anka

BAYKAR Teknoloji | Fotoğraf Galerisi. (n.d.). Retrieved June 19, 2026, from https://baykartech.com/tr/fotograf-galerisi/

Bento, M. D. F., (2008). Unmanned Aerial Vehicles: An Overview. InsideGNSS, Ocak/Şubat: 54-61.

Chang, V., Chundury, P., & Chetty, M. (2017). "Spiders in the sky": User perceptions of drones, privacy, and security. In Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Association for Computing Machinery.

Congressional Budget Office. (2011). Policy options for unmanned aircraft systems. https://www.cbo.gov/sites/default/files/112th-congress-2011-2012/reports/06-08-uas.pdf

Demirkıran, Z. (2010). İnsansız hava araçlarının gelişimi. Bilim ve Teknik, 517, 28–31.

Duyar, A., & Selçuk, H. (2025). Türkiye'de İHA/SİHA alanında yaşanan gelişmeler ve muharebe ortamına yansımaları. International Journal of Social and Humanities Sciences Research (JSHSR), 12(119), 1016–1030.

Elmas, E. E., & Alkan, M. (2023). Bir insansız hava aracı sisteminin tasarımı, benzetimi ve gerçekleştirilmesi. Politeknik Dergisi, 26(2), 929–940.

Ezuma, M., Anjinappa, C. K., Funderburk, M., & Guvenc, I. (2022). Radar cross section based statistical recognition of UAVs at microwave frequencies. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 58(1), 27–46. https://doi.org/10.1109/TAES.2021.3096875

Ezuma, M., Funderburk, M., & Guvenc, I. (2020). Compact-range RCS measurements and modeling of small drones at 15 GHz and 25 GHz. In 2020 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS) (pp. 313–316). IEEE. https://doi.org/10.1109/RWS45077.2020.9050049

Ezuma, M., Ozdemir, O., Anjinappa, C. K., Gulzar, W. A., & Guvenc, I. (2019). Micro-UAV detection with a low-grazing angle millimeter wave radar. In 2019 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS) (pp. 1–4). IEEE. https://doi.org/10.1109/RWS.2019.8714203

Haider, A. (2014). Remotely piloted aircraft systems in contested environments: A vulnerability analysis. Joint Air Power Competence Centre.

İHA Kullanım Alanları-Shark Aviation. (n.d.). Retrieved June 19, 2026, from https://sharkaviation.com.tr/iha-kullanim-alanlari/

İHA'larda Pasif Stealth: Radar Kesit Alanını (RCS) Azaltma Yolları. - Nanokar Nanoteknoloji. (n.d.). Retrieved June 19, 2026, from https://www.nanokar.com.tr/blog/ihalarda-pasif-stealth-radar-kesit-alanini-rcs-azaltma-yollari

Jarabo-Amores, M. P., Mata-Moya, D., Gómez-del Hoyo, P. J., Bárcena-Humanes, J., Rosado-Sanz, J., Rey-Maestre, N., & Rosa-Zurera, M. (2018). Drone detection feasibility with passive radars. In 2018 15th European Radar Conference (EuRAD) (pp. 313–316). IEEE.

KARABOĞA, F. (2022). İnsansız Hava Araçlarının Sınıflandırılması | Turkish Defence Agency. https://tdefenceagency.com/insansiz-hava-araclarinin-siniflandirilmasi/

Knott, E. F., Schaeffer, J. F., & Tulley, M. T. (2004). Radar cross section (2nd ed.). SciTech Publishing/IET.

Kobayashi, H., & Moriyama, T. (2020). Special issue on "Advanced technology related to radar signal, imaging, and radar cross-section measurement". Electronics, 9, 653.

Liu, H., Kuang, L., & Liu, Q. H. (2019). Targets recognition based on deep learning. In 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium-Fall (PIERS-Fall) (pp. 1393–1400). IEEE.

McGlynn, D. (2013). Domestic drones. CQ Researcher, 23(37), 885–908.

Milli İHA'lar ilk kez deprem bölgesinde-Son Dakika Haberleri. (n.d.). Retrieved June 19, 2026, from https://www.trthaber.com/haber/turkiye/milli-ihalar-ilk-kez-deprem-bolgesinde-456456.html

Nano Malzemelerin İHA'ların Ağırlığına Etkisi: Gizlilik vs. Performans- Nanokar Nanoteknoloji. (n.d.). Retrieved June 19, 2026, from https://www.nanokar.com.tr/blog/nano-malzemelerin-ihalarin-agirligina-etkisi-gizlilik-vs-performans

Özkan, H. (2016). İnsansız hava araçlarının/drone'ların Türk sivil havacılık hukukuna göre statüsü, unsurları ve ceza hukuku boyutuyla güncel sorunlar. Türkiye Barolar Birliği Dergisi, 125, 341–386.

Patole, S. M., Torlak, M., Wang, D., & Ali, M. (2017). Automotive radars: A review of signal processing techniques. IEEE Signal Processing Magazine, 34(2), 22–35.

Pieraccini, M., Miccinesi, L., & Rojhani, N. (2017). RCS measurements and ISAR images of small UAVs. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 32, 28–32.

Radar Horizon ve Hedef Görünürlük Hesaplayıcısı • RF ve Elektronik Hesap Makineleri • Çevrimiçi Birim Dönüştürücüler. (n.d.). Retrieved June 19, 2026, from https://www.translatorscafe.com/unit-converter/tr-TR/calculator/radar-horizon/

Shakhatreh, H., Sawalmeh, A. H., Al-Fuqaha, A., Dou, Z., Almaita, E., Khalil, I., Othman, N. S., Khreishah, A., & Guizani, M. (2019). Unmanned aerial vehicles: A survey on civil applications and key research challenges. IEEE Access, 7, 48572–48634. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909530

Skolnik, M. I. (Ed.). (2008). Radar handbook (3rd ed.). McGraw-Hill.

Solomitckii, D., Gapeyenko, M., Semkin, V., Andreev, S., & Koucheryavy, Y. (2018). Technologies for efficient amateur drone detection in 5G millimeter-wave cellular infrastructure. IEEE Communications Magazine, 56, 43–50.

Söner, S. (2020). Radar Teknolojisi-. https://blog.havacilikpsikolojisi.net/radar-teknolojisi/

STM'nin Taktik Mini İHA Sistemleri Kış Tatbikatı'na Damga Vurdu. (n.d.). Retrieved June 19, 2026, from https://www.stm.com.tr/tr/haberler/stmnin-taktik-mini-iha-sistemleri-kis-tatbikatina-damga-vurdu

Ullah, M. U., Abdul Latef, T. B., Othman, M., Hussein, M. I., Alkhoori, H. M., Yamada, Y., Kamardin, K., & Khalid, R. (2024). A progression in the techniques of reducing RCS for the targets. Alexandria Engineering Journal, 100, 153–169. https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.05.001

Ünalır, D., Yalçınkaya, B., & Aydın, E. (2025). Low signature UAVs: Radar cross section analysis, simulation, and measurement in X-band. Signal, Image and Video Processing, 19, Article 568. https://doi.org/10.1007/s11760-025-04074-y

BÖLÜM 21

Yeşil Liman Karbonsuzlaştırma Unsurları

Mükerrem Fatma İlkışık[1]

[1] Prof. Dr., İstanbul Nişantaşı Üniversitesi Mühendislik mimarlık Fakültesi Maslak Taşyoncası sok. NoIV sarıyer Istanbul, Orcid 0009-0001-2478-7173



GİRİŞ: Denizcilik faaliyetlerinden kaynaklanan kirlilik özellikle liman bölgelerinde artış göstermektedir.Deniz kirliliğinin yanısıra hava kirliliği yüksek miktarda partikül madde, azot oksitler, kükürt oksitler, karbon monoksit ve diğer kimyasalların atmosfere salınmasıyla deniz canlılarına ve tüm ekosisteme zarar vermektedir.



İklim değişikliğinin temel nedenlerinden seragazı emisyonlarının azaltılması için karbonsuzlaştırılma limanlarda da dikkate alınarak emisyon azaltım stratejileri geliştirilerek küresel sürdürülebilirlik hedeflerine uyum sağlamaları mümkün olabilir.Karbon emisyonlarını sınırlayarak düşük karbonlu malzeme kullanımı ve çevre etkisi dikkate alınarak limanın saglık açısından olumsuz etkileri azaltılabilir.

1.LİMAN YAPIMI VE İŞLETİLMESİ

1.1 Liman yapımında ve işletilmesinde aşagıdaki unsurlar dikkate alınmalıdır:



1.1.2 Liman yerinin seçiminde kıyı morfolojisi koydaki dalga tipi deniz jeolojisi meteorolojik şartlar etken olmakta yeşil alanların korunması kirliğin oluşmamasında önemli faktörlerdir.



1.1.3 Limanlarda gemi trafiğinin yoğun olması ve demir alanında bekleyen gemiler de ilave bir kirlilik artışı getirmektedir.



1.1.4 Liman kirlenmesinde gemilerin kargo operasyonu esnasında oluşabilecek kazalar da etkili olmaktadır. lojistik işlemlerin durmasının yanısıra petrol ve kimyasal kargoların dökülmesi veya buharlaşması çevreye zarar verebilir ve insan sağlığı için potansiyel tehdit oluşturabilir.





1.1.5 Liman içi, liman girişi ve limanın yaklaşım kanalının, limanı kullanacak gemiler için yeterli derinlik ve genişlikte olmalıdır.Akıntı dereağzı gibi etkenlerle taşınan sedimantasyonu da dikkate almak gerekir. Derinlik yetersiz ise deniz dipi taraması yapılacaktır.Bu durumda deniz canlıları yok olacak biyolojik çeşitlilik azalacaktır.



1.1.6 Balast sularıyla taşınan zararlı deniz canlıları deniz kirliliği yaratarak turizm bölgelerine de zarar verecektir.Balast sularının limanda alınması da ekonomik olmayan balast suyu arıtma yöntemlerine bir alternatif olabilir.Böylece zararlı ve faydalı bileşenlerden faydalanmak mümkün olur.



1.1.7- Liman emisyon miktarının düzenli olarak raporlanması belli bir sınır değerin üzerine çıkmamasını saglanmalıdır. http://www.gemihaberleri.com



2.GEMİLERDEN HAVA KİRLİLİĞİNİN ÖNLENMESİ

2.1 ECA BÖLGELERİ VE EMİSYON ORANLARI

"Emisyon Kontrol Alanı" İnsan sağlığına ve çevreye olumsuz tesiri olan ve partiküller maddelerin ve gemilerden emisyonların SOx ya da NOx hava kirliliğinin kontrolü, azaltılması ve önlenmesi için özel zorunlu önlemlerin kabul edildiği alanlardır. Emisyon Kontrol Alanları olarak adlandırılır(ECA). IMO tarafından tayin edilen liman bölgesini de içeren ECA deniz alanıları Kuzey Amerika alanı ;ve Birleşik Devletler Karayipler denizi;ve Baltık deniz alanı;ve Kuzey deniz alanıdır.

ECA bölgeleri dışında gemide kullanılan ya da kullanılmak üzere taşınan yakıt ya da içindeki SOx miktarı %0.5 m/m geçemez Emisyon kontrol alanları içinde ise gemilerde kullanılan ya da kullanılması için taşınan yakıttaki sülfür miktarı % 0.10 m/m limit değerleri geçmeyecektir .



1 Mayıs 2025'ten itibaren Akdeniz, Emisyon Kontrol Alanı (ECA) olarak belirlenecek ve yakıtında izin verilen maksimum kükürt içeriği %0,5'ten %0,1'e düşürülecektir.

Bu girişim, deniz emisyonlarını azaltmayı ve 2030 için belirlenen çevresel hedeflere ulaşmanın yolunu açmayı amaçlayan daha geniş "2025'te Deniz Taşımacılığını Etkileyen Düzenlemeler" çerçevesinin bir parçasıdır. Bu önlemler, Akdeniz bölgesindeki hava kalitesini, halk sağlığını ve deniz ekosistemini korumada önemli bir adım anlamına geliyor.Ancak bölge tanımında Çanakkale boğazına kadar olan kısmı içermektedir.

Akdeniz'deki yeni ECA düzenlemelerine uyum, gemide yakıt örneklemesi enspektör tarafından kükürt içeriğini doğrulamak için gemilerden yakıt örnekleri alacaklardır. Bu örnekler, %0,10 kükürt sınırına uyumu sağlamak için sertifikalı laboratuvarlarda analiz edilecektir.

Gemilerin yakıt kullanım ve tedariklerinin doğru kayıtlarını tutmaları gerekecektir. Bunker Teslimat Notlarını ve gemi jurnali incelenecektir.

SO2 emisyonlarını azaltmak için diğer bir strateji, daha temiz yakıtların kullanımıdır. Örneğin, sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG),LPG,metanol yada etanol gibi düşük sülfür içeriğine sahip yakıtların kullanılması, SO2 emisyonlarını önemli ölçüde azaltabilir. Ayrıca, sülfür emisyonlarını kontrol etmek için egsoz gaz yıkama (scrubber) sistemleri gibi teknolojiler de kullanılabilir.

2.2 Emisyonların raporlanması



Denizcilik şirketlerinden Avrupa limanları arasında sefer yapan gemilerin yakıt tüketimini, CO2 emisyonlarını diğer önemli parametrelerin izlenmesini ve raporlanmasını istenmektedir.

5000 groston ve üzeri her gemi SEEMP(Gemi enerji verimliliği yönetim planı) planında yer alan metodolojiye uygun olarak yakıt tüketim verilerini her takvim yılı için toplayacaktır.Gemi yakıt tüketim verileri ve operasyonel karbon yogunluğu bayrak devleti tarafından doğrulanacaktır. Gemiler operasyonel karbon yoğunluğu derecesine göre A,B,C,D olarak sınıflandırılıp gemi üç yıl üstüste D derecesi ya da E derecesi alması durumunda İdare, geminin A ya da B derecesini saglamak için özendirilecektir.Limanlara uğrayan gemiler tarafından kullanılan enerjinin sera gazı içeriğine maksimum sınır getirerek ve sıfır emisyon teknolojisini teşvik ederek yenilenebilir deniz yakıtlarına ve düşük karbonlu yakıtlara olan taleb artırılmalıdır.



3.Yeşil Liman

Çevre politikalarını benimsemiş limanlar Ecoport statüsünde Pers sertifikası almaktadırlar. EcoPorts platformu yeşil liman konseptini kendi bünyesinde uygulamak isteyen limanlar için "Liman Çevresel İnceleme Sistemi (Port Environmental Review System, PERS) belgesi alınır Memleketimizde de Ulaştırma ve alt yapı bakanlığı tarafından yeşil liman belgesi verilmektedir.

Limanlarda elleçlenen yükün tipine göre de kirlilik artış gösterebilir.Rafinerilerin yanı sıra kömür,çimento, cevher v.b benzeri malzemelerin elleçlenmesi esnasında oluşabilecek kazalar kirliliği artıracaktır.



3.1.Alternatif yakıtların kullanılması

Hidrojen,amonyak,methanol,biyokütle,LPG,LNG gibi alternatif yakıtlarla işletilen gemiler ve bunların tedariki ve limanda elektrifikasyon sistemlerinin kurulmasıyla sürdürülebilir yeşil limanlara teşvik verilmelidir.

Hidrojen gazının veya sıvısının akışı veya çalkalanması, elektrostatik yükler oluşturabilir ve kıvılcımlara ve tutuşmaya neden olabilir. Hidrojen renksiz ve kokusuzdur, bu nedenle sızıntıları tespit etmek zordur ve aynı şey görünmez alev için de geçerlidir. Hidrojen ayrıca diğer yakıtlara kıyasla son derece hızlı yanar. Zehirli olmamasına rağmen, yüksek konsantrasyonlardaki hidrojen oksijenin yerini alabilir ve bu da boğulma risklerine yol açabilir Sıvılaştırılmış hidrojenin atmosfer basıncında gemilerde depolanması, -253° C'lik çok düşük kaynama sıcaklığı nedeniyle zordur. İnsan derisiyle temasta donmalara yol açar.

Denizden elektroliz ile temiz hidrojen üretimi mümkündür. Deniz suyunu azot ve hidrojenden oluşan bir molekül olan hidrazin ile karıştırılarak hidrojen üretiminin verimliliğini önemli ölçüde artırabiliyor.

Amonyak deniz ekosistemi ve gemide bulunanlar için toksiktir .Amonyak cıva, bakır, bakır içeren alaşımlar ve çinko ile temas etmemelidir. CO_2 ile etkileşimi karbamatlar oluşturabilir ve kargo sistemlerinde tıkanıklıklara ve hasara yol açabilir. Yüksek sıcaklıklarda patlama riski vardır.

Biyometan, anaerobik ayrıştırma ve gazlaştırma.ile elde edilebilirAnaerobik ayrıştırma,oksijensiz bir ortamda tarımsal artıklar ve algler gibi organik maddeleri parçalamak için mikroorganizmaları kullanır. Bu yöntem çoğunlukla metan ve CO2'den oluşan biyogaz üretir. CO2 ve diğer bileşenleri ortadan kaldırmayı amaçlayan bir dizi prosedür kullanılarak elde edilen son ürün biyometandır.

Atıksuyun arıtılmasıyla ortaya çıkan biyogazı kullanarak, bu gazdaki karbondioksiti yeşil hidrojenle reaksiyona sokarak karbon nötr metanol üretmek mümkündür. Bu metanol, gemi yakıtı olarak kullanılabilir.

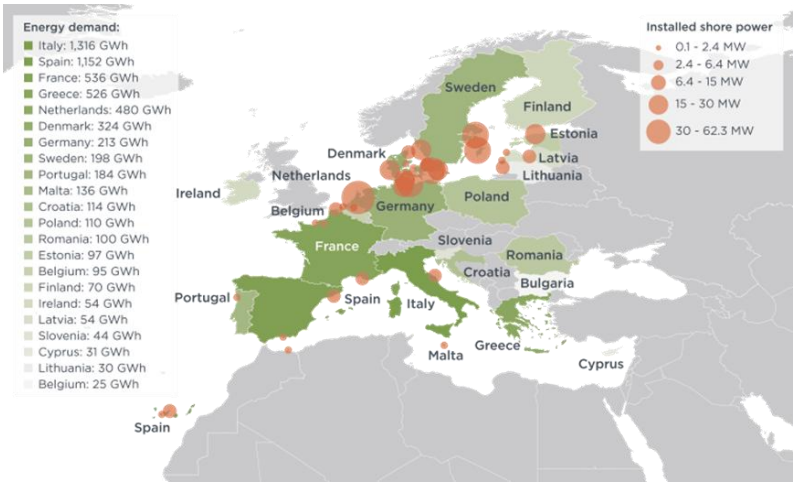
Biyodizel, sera gazı emisyonlarını azaltma kapasitesine sahip bir yakıt seçeneğidir.Atık kalıntıları ve yağ bitkileri biyodizel üretiminin ana kaynaklarıdır. Kullanılmış yemeklik yağ ve hayvansal yağlar gibi atık artıkları, yeniden kullanarak sürdürülebilir bir alternatif sunar. Soya fasulyesi, kanola ve ayçiçeği gibi yağ bitkileri, biyodizele dönüştürülebilen yenilenebilir bir bitkisel yağ tedariği sağlar.

Metanolle çalışan gemiler, deniz taşımacılığının karbondan arındırılmasına yardımcı olabilecek yenilikçi bir çözümdür.Metanol karbon nötr bir yakıttır. Taşınması güvenlidir ve CO2 ve kükürt oksitleri (SOx) emisyonlarını azaltır.

Metanol de toksik olup solunması körlük ve can kaybına yol açar.Tutuşma noktasına (11° C) ve yüksek buharlaşma ısısına sahip yanıcı bir sıvıdır. %25'in üzerinde metanol-su karışımıhala yanıcı olabilir. Metanol alevi duman üretmeden neredeyse görünmezdir ve ilk aşamalarda fark edilmeyebilir.Metanol korozyona neden olur, bu nedenle karbon çeliklerinin korunması için özel kaplamaya veya paslanmaz çelik kullanılması gerekir. Yakıt tanklarında ve borularda kullanılan metal olmayan malzemeler, naylon,neopren veya bütil olmayan kauçuk gibi uygun metanol uyumlu malzemelerden oluşmalıdır.Metanol biyolojik olarak parçalanabilir ve deniz ortamlarında geleneksel hidrokarbon yakıtlarından daha az zararlı olsa da, yüksek konsantrasyonlar yine de su canlıları için risk oluşturabilir.Okyanusta doğal olarak bulunur, fitoplankton tarafından üretilir ve bakteriler tarafından tüketilir

Hidrojenden üretilen amonyak, deniz taşımacılığında hidrojen yakıt hücrelerine bir alternatif olabilir.Hidrojenin yaygın kullanımındaki ortak bir zorluk, gazın nispeten düşük enerji yoğunluğu nedeniyle depolanmasıdır ve bu da daha uzun yolculuklar için sorunlu hale gelir.Bu nedenle daha küçük gemilere veya kısa seferler için uygundur.

3.2.ELEKTİRİFİKASYON



Mevcut EU limanları elektrik güç üniteleri

Yoğun nüfuslu bölgelere yakın olan limanlarda hava kirliliğini azaltmak amacıyla, 2030 yılı itibarıyla yolcu gemileri ve konteynerlerin büyük AB limanlarında rıhtıma demirlemiş durumdayken tüm elektrik ihtiyaçları için kıyıdaki elektrik kaynağını kullanma zorunluluğu getirilmiştir.

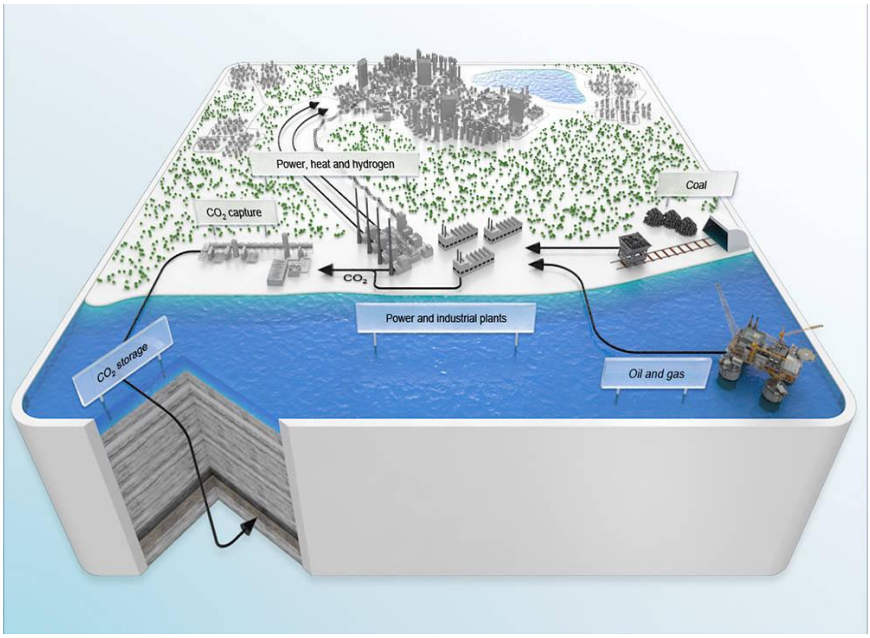
Emisyonları yüksek olan yolcu gemileri ve konteynırlar için bir önlemde FuelEU Denizcilik yönetmeliği Madde 6'ya göre, 1 Ocak 2030'dan itibaren kıyı elektriğine bağlanacaktır; çünkü bunlar, rıhtımda demirliyken gemi başına en yüksek emisyona sahiptir.

En çok enerji tüketen gemi türleri tankerler ve yolcu gemileri olmuştur.

Halen 15 EU kıyı devleti 51 limanda, 283 MW'ı konteyner, yolcu ve yolcu gemileri için olmak üzere 309 MW güç sağlayan kıyı enerji altyapısı bulunmaktadır. 2030 yılına kadar kurulu kıyı gücünü en az üç katına çıkarması hedeflenmektedir.

2030'dan itibaren, konteyner gemileri ve yolcu gemilerinin, Trans-Avrupa Taşımacılık Ağı (TEN-T) limanında iki saatten fazla yanaşma durumunda kıyı gücüne bağlanmaları gerekecektir. 2035'ten itibaren bu gereklilik, kıyı gücünün mevcut olduğu tüm limanlar için geçerli olacaktır.

Tüm bu alınan önlemlerin yanısıra gemide ve /veya karada karbon yakalama tesisleri de teşvik edilerek karbon ticaretine dahil olunacağından yatırımların geri dönüşümü saglanabilir.

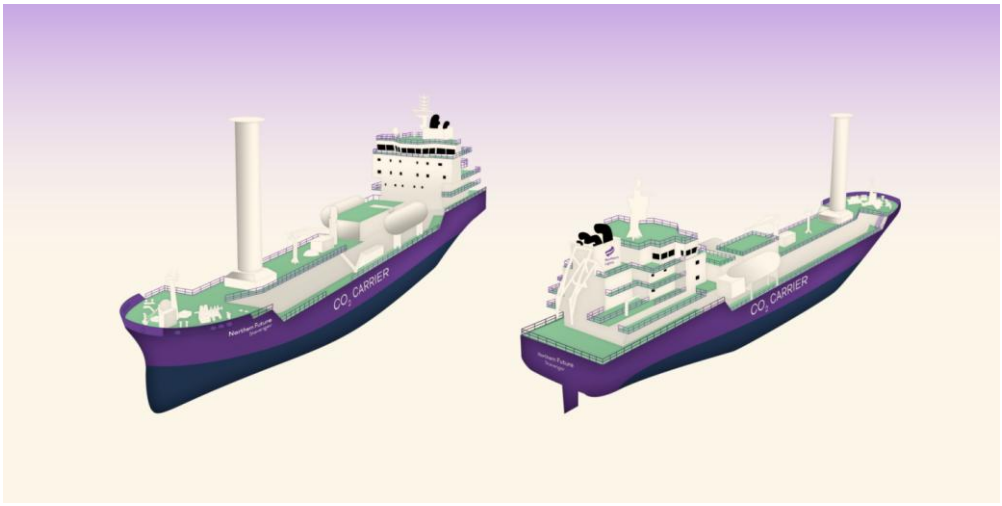


3.3 KARBON YAKALAMA VE DEPOLAMA

Karbon Yakalama ve Depolama (CCS), karbondioksiti (CO2) yakalayıp uzun vadeli depolama alanlarına göndererek atmosfere salınımını önleyen bir teknolojidir. CO2, genellikle tuzlu akiferler, tükenmiş petrol ve gaz rezervuarları ve bazalt kaya oluşumları gibi jeolojik formasyonlarda depolanır.Karbon; gübre üretimi, sentetik yakıtlar, beton katkı maddeleri ve kimyasallar gibi alanlarda kullanılabilir.

Burada amaç CO2 in havaya karışmadan önce bir prosesden geçirilip depolanması ve sonra boru hatları ya da gemilerle taşınmasıdır.Depolama yerin alt katmanlarında derinde kaya tabakaları arasında yapılmaktadır. Yılda en az 45 mil.ton CO2 depolanması amaçlanmaktadır.

CO2 in elde edilme süreçi endüstriyel kaynaktan salınan gazı, içinde çözücü madde bulunan bir emiciye göndermekle başlıyor. Bu gazın içindeki CO2 toplanıyor, diğer gazlar geri bırakılıyor. Sonrasında çözücü madde, CO2 'den yüksek ısı kullanarak ayrıştırılıyor ve gaz sıkıştırılarak akışkan hale dönüştürülerek yeniden kullanıma sokuluyor. Arıtılmış CO2 ise yerin altında,yaklasık 2600feet derinlikte kuyularda ve kayalarda depolanıyor. Bu proses kuzey denizinde ve Norveç,Finlandiya ,Danimarka kıyılarında yapılmıştır.



Karbon taşıyıcı gemiler

Diğer bir yöntemde gemide bacagazlarının ayrıştırılması ile yapılarak gemide depolanmaktadır.

Norveç kıyılarında Northern Lights firması CO2 emisyonlarının denizin altında depolama çalışmalarına başlamıştı . 2024 itibaren faz 1 faaliyete geçerek yılda 1.5 million ton CO2 depolanacak. 2026 yılına kadar 5 mil. tona çıkarılması hedeflenmektedir.

CCUS maliyetleri, yakalama için 40-90 EUR/t CO2, taşıma için 2-30 EUR/t CO2 ve depolama için 5-35 EUR/t CO2 arasında değişmektedir. Maliyet, ölçek ve bölgeye göre farklılık gösterebilir.

Çimento, demir-çelik, rafineri, hidrojen üretimi ve enerji santralleri gibi yüksek emisyonlu sektörler CCUS teknolojilerini kullanmaktadır.



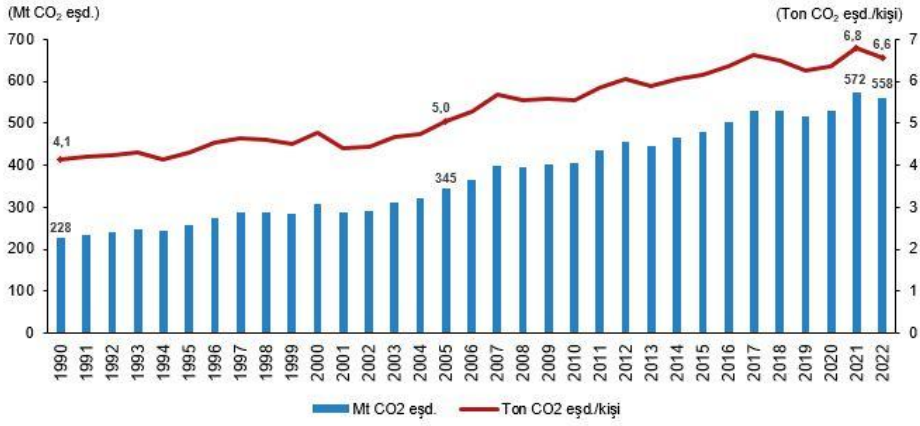
4.KARBONSUZLAŞTIRMA

Temel teknolojik çözümler arasında karbon yakalama, kullanma ve depolama (CCUS); alternatif yakıtların benimsenmesi; ve kalsine edilmiş killer ve tamamlayıcı çimentolu malzemelerin kullanımı yer alır.

4.1 ÇİMENTO

Küresel sera gazı (GHG) emisyonlarının %7-8'inden sorumlu olan çimento endüstrisi, küresel altyapı ve ekonomik kalkınmadaki kritik rolünü korurken çevresel etkisini azaltmak için artan bir baskıyla karşı karşıyadır. Türkiye Sera Gazı Envanteri'ne göre, 2021 yılı itibarıyla, enerjiden kaynaklanan cam, çimento ve seramik üretimi emisyonları 32,7 milyon ton CO2 , IPPU (Endüstriyel Süreçler ve Ürün Kullanımı) kaynaklı çimento emisyonları ise 44,2 milyon ton CO2 olarak gerçekleşmiştir.

Toplam ve kişi başı CO2 emisyon(Tuik)



Teknolojik olarak 1 ton çimento üretildiğinde yaklaşık 650 kg CO_2 eşdeğeri emisyon ortaya çıkmaktadır. Sınırda karbon düzenlemesi yükümlülüğü = Emisyon x Ürün (Ton) [x Karbon Fiyatı] olup 1 ton çimentonun ihracatı için ortalama satış fiyatı 57 $' dır.(Ocak 2024 güncel karbon fiyatları ve çimento ihracat/satış miktarları dikkate alınmıştır)

TÜSİAD'ın çalışmalarına göre, SKDM Türkiye'nin AB'ye ihracatını ciddi bir vergi artışıyla etkileyecek. Hesaplamalar, karbon fiyatının 100€/ton olduğu senaryolarda, Türkiye'nin AB'ye yıllık 3,6 Milyar € ödemesi gerekeceğini gösteriyor. İlk etapta vergiden en fazla etkilenecek sektör çimento sektörü olacak.

Çimento üretimindeki emisyon kaynakları şu şekilde dağılmıştır: GHG emisyonlarının yaklaşık %50'si hammaddelerden, %40'ı yakıt yanmasından, %5'i elektrik tüketiminden ve kalan %5'i ulaşımdan kaynaklanmaktadır.

Kalsine edilmiş killer, geri dönüştürülmüş cam ve geri kazanılmış kömür külü gibi çimento katkı malzemeleri karbonsuzlaştırmaya olumlu etkisi olmaktadır.

Kalsine edilmiş kil, metakaolin ve kireçtaşı tozu arasındaki sinerjik reaksiyondan yararlanarak klinker içeriğinde %50'ye kadar bir azalma ve CO_2 emisyonlarında %40'lık bir azalma sağladığı için umut verici bir çözüm olarak öne çıkıyor .

Katkı malzemelerine ek olarak, jeopolimerler de dahil olmak üzere alkali aktive edilmiş malzemeler , geleneksel Portland çimentosuna karşı bir alternatiftir. Bu malzemeler, olağanüstü mekanik mukavemet ve kimyasal dayanıklılık sağlarken karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltmak için uçucu kül, cüruf ve metakaolin gibi endüstriyel yan ürünler kullanır .

Limanlarda atık alım tesislerinde gemilerden alınan sintine ve slaç gibi atıkların susuzlaştırılarak çimento sektöründe kullanılabilir.

Yenilenebilir enerji kullanılarak çalıştırılan elektrikli bir çimento üretim süreci geliştirerek emisyonları standart üretim sürecinden ayırmak mümkündür.

4.2 Diğer karbonsuzlaştıran malzemeler

Kenevir betonu : kenevir liflerinin kireçle karıştırılmasıyla elde edilen kenevir betonudur. Bu malzeme hafiftir, yüksek yalıtım özelliğine sahiptir ve kürlenme sürecinde karbondioksiti emerek iklim açısından olumlu bir seçimdir.

- Cam köpüğü :Geri dönüştürülmüş camın ısıtılmasıyla üretilir
- Geri dönüşümlü plastik
- Saman :yüksek yalıtım değeri sunar ve karbon tutulmasına katkıda bulunur.
- Ahşap :Karbon tutucu görevi görür, CO2'yi hapseder ve betona kıyasla daha az karbon ayak izi sunar.
- "Bambu, mantar ,Lignin,selülüz
- Geri dönüştürülmüş beton
- Biyo bazlı fiberglas

5. YEŞİL BETON

Beton yapımında hurda çelik,cam,inşaat atığı gibi geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanıldığı sürdürülebilir teknolojidir.Yangın ve korozyona karşı geleneksel betona göre daha avantajlıdır.

Düşük karbonlu beton, geleneksel betondan daha düşük karbon ayak izine sahip betondur. Bu da genellikle çimento ana maddesi klinker miktarının azaltılması yoluyla elde edilir.Bunun en bilinen ve etkili yolu; klinkerin yerine uçucu kül, yüksek fırın cürufu,doğal puzolan gibi mineral katkılar kullanılmasıdır.



İskenderun limanı 6 şubat 2023 deprem hasarı

Akdeniz iklimi gibi sıcak bölgelerde limanlardaki , asfalt, ve diğer yüzeylerden kaynaklanan ısı çevredeki canlı faaliyetini olumsuz etkileyecektir. Bu durum, sıcak hava akımlarını değiştirerek yerel iklimi etkileyebilir. Emisyonu artıran asfalt yerine beton yollar tercih edilmelidir.Beton basınça çalışan bir malzeme olduğundan agır yük taşıyan araçların yanısıra bir deprem gibi afet durumunda daha mukavemetlidir.

Yeşil çimentolar, CEM I-Portland çimentosu haricinde TS EN 197-1 standardına göre %95'ten az klinker ve %5'ten fazla mineral katkı içeren (örneğin kalker, silis dumanı, uçucu kül, puzolan) çimentolardır ve bu katkılara göre farklı gruplara ayrılır.

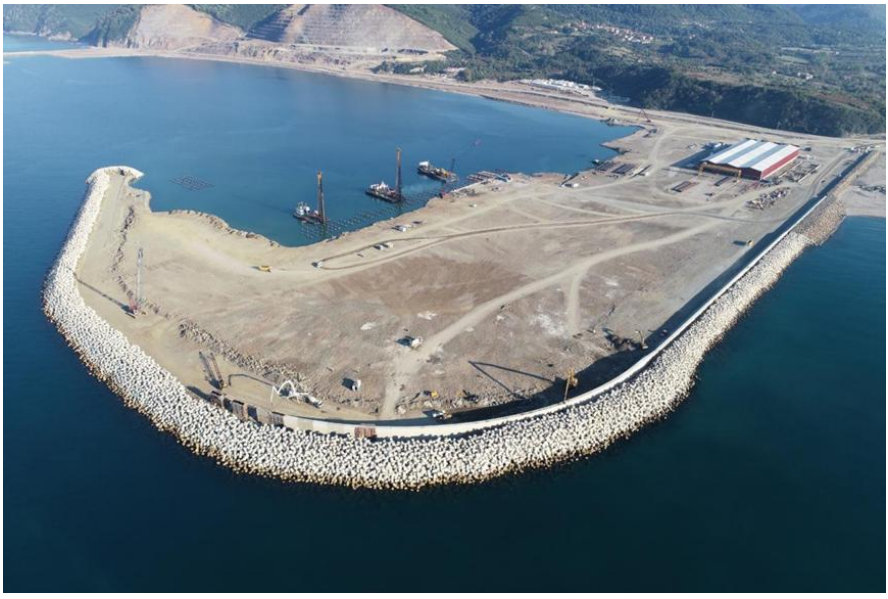
Kamu ihale sözleşmelerinde düşük karbon emisyonuna sahip yeşil çimento kullanımının yaygınlaştırılmasına ilişkin tebliğ geregince kamu yapım işi sözleşmeleri ve çimento içerikli mal alımı ihalelerinde2025-2030 arasında kamu yapım işi sözleşmeleri ve çimento içerikli mal alımı ihalelerinde kullanılacak çimentoda klinker/çimento oranı en fazla 0,80, 2030 sonrasında ise en fazla 0,75 olarak sınırlandırılmıştır. Yeşil Çimento Tebliği ile klinker/çimento oranı nın sınırlandırılması, özellikle kamu projelerinde kullanılacak hazır betonlarda CEM I tipi çimentodan CEM II ve CEM IV tipi çimentolara geçişi hızlandıracaktır.

6. LİMAN İNŞAATINDE BETON BLOK KULLANIMI

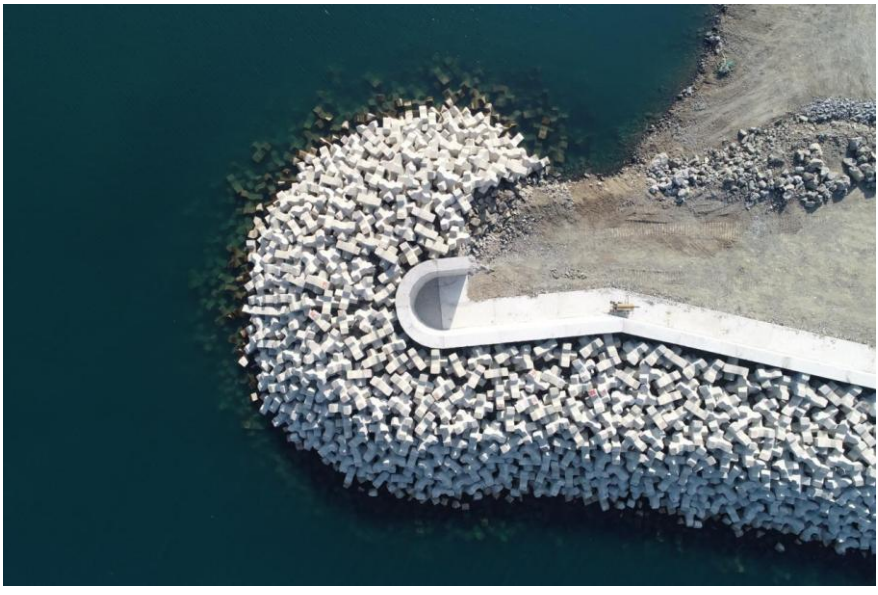


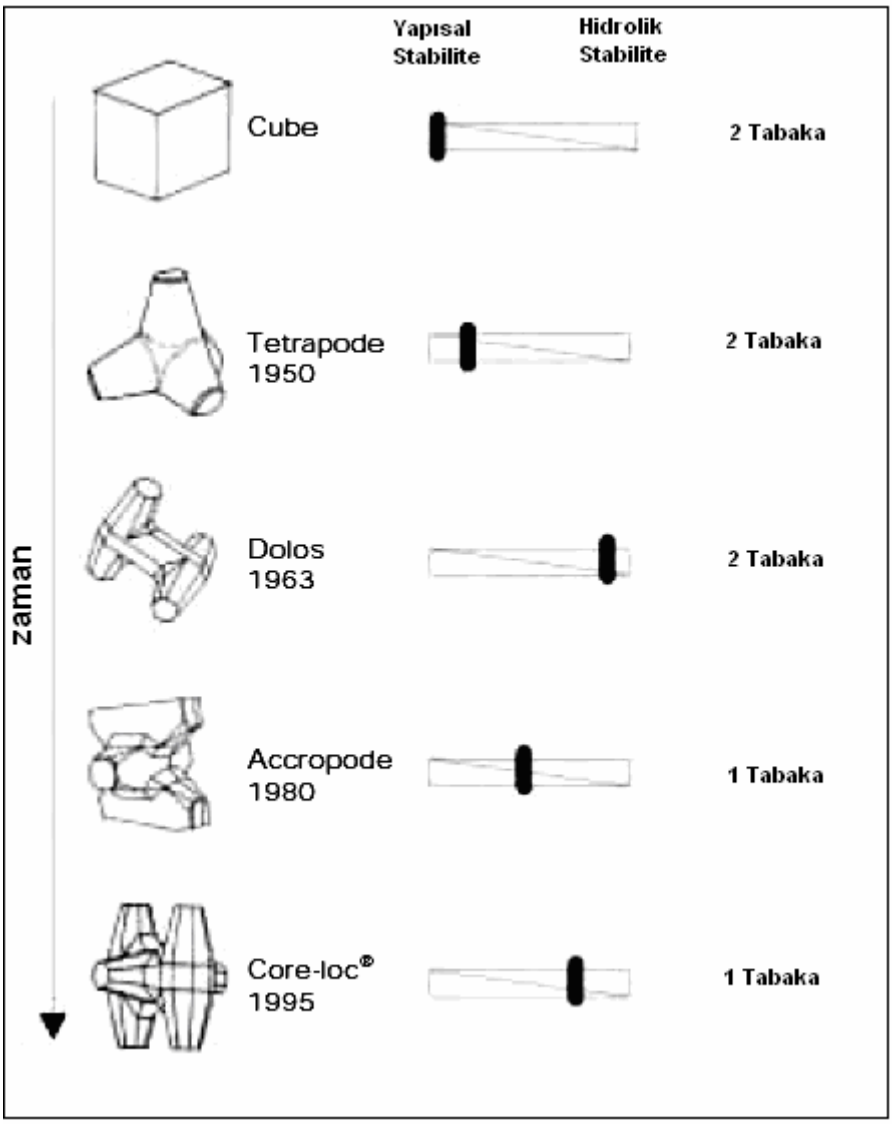
Yeşil beton liman yapımında şiddetli dalgalara karşı çeşitli şekillerdeki beton bloklarda kullanılabilir. Yeni nesil beton blokların kullanımı ağırlığın

azaltılmasında ve ekipman gereksiminde önemli ölçüde tasarruf saglayacaktır.Boşluklu malzemelerin betonda kullanılması dalga enerjisinin sönümlenmesinde yararlı olacaktır.



Filyos Limanı





Beton Blok tipleri

Dalgakıranlarında dalgaların dinamik yükünü ilk önce karşılamak üzere geliştirilen ilk prefabrik beton blok modeli Fransa'nın Antifer limanına uygulanan ve adını da buradan alan "ANTIFER CUBE" lerdir. Pek çok limanda uygulanmış Antifer Cube kaplamalar yerini daha sonra Fransa'nın Sogreah Laboratuarlarında yapılan deneysel araştırmalarla geliştirilen "TETRAPODE" lara bırakmıştır.

Tetrapode lardan sonra aynı laboratuarlarda geliştirilen "DOLOS" lar kullanılmıştır. Şekil itibari ile hidrolik stabilitesi daha yüksek olan Dolos ların yerine 1980 yılında Sogreah Laboratuarları ekonomik anlamda büyük avantaj sağlayan "ACCROPODE" ları geliştirmiştir. Birbirine daha iyi kenetlenen bu

model ayrıca Sogreah tarafından geliştirilen ilk patentli modeldir.Prefabrik beton bloklarda en son gelişmeyi Accropode lara alternatif olarak Core-Loc lar Accropode lara göre daha yüksek hidrolik stabiliteye sahip olmasından dolayı dalgakıranlarda güvenlik açısından projelerde tercih sebebi olmuşlardır.

Cube ve Antifer Cube: Bu tip bloklarda her bir birim için kullanılan çimento oranı 300 kg/m3 'ten az, su-çimento oranı %45' ten az olmalıdır. Ayrıca kullanılan agrega dışarı ile temas etmemeli ve geçirimsiz beton kullanılması gerektiğinden deniz yapıları için uygun değildir.

Tetrapode: Tetrapode' lar iki sıra kullanılırlar. Uygulamada birinci (alt) tabakada şekilsel olarak üç ayak dalgakıranın eğimli yüzeyine oturacak şekilde yerleştirilir. İkinci sırada ise tek ayak aşağı veya üç ayak aşağı bakacak şekilde yerleştirilir. Tek ve üç ayağın yukarı bakma durumuna göre stabilite değişmektedir. Tek ayak yukarı bakacak şekilde yerleştirildiğinde daha az stabilite elde edilmektedir. Ayrıca tek ayak yukarıda uygulamasında %20 daha az beton kullanılmaktadır.

Core Loc: Prefabrik beton bloklardaki en son tasarım olan Amerikan CLI şirketinden patentli "Core Loc" lardır. Bu yeni tasarım, Accropode larla başlayan "Single Layer" dalgakıran uygulamalarını bir adım daha ileri taşıyarak hem ekonomik hem de güvenlilik yönünden avantaj sağlamıştır.

XBlok beton bloklar koruma tabakası olarak dalgakıranlarda son yıllarda en çok kullanılan tiptir.X şeklinde olup ortasında delik bulunmaktadır Bu delik suyun yukarı doğru kaldırmasını engellemek ve poroziteyi artırmak amacıyla yapılmıştır.Dalgakıran topuğunda basınca karşı etkili olurken çekmeye mukavemetsız olmaktadır bu yüzden porozitenin fazla olduğu ya da çapraz yerleştirildiği gibi ortası delikli formlarda kullanılabilir.

XBlokPlus tasarımı diger dalgakıran malzemelerine göre daha düşük maliyetlidir.Kaya yapılara kıyasla yapının 50 yıllık ömrü boyunca onarım gereksinimi daha azdır.XblokPlus tasarımı iklim değişikliği ile artan dalgalara karşı daha dayanıklı ve karbon emisyonları kaya yapılara göre daha düşüktür.

7.ALTERNATİF ENERJİ KAYNAKLARI

7.1 DALGA ENERJİSİ

Güneş, fotovoltaik, elektrik, rüzgar biogas,lng alternatif enerji kaynaklarının yanısıra ülkemizde faydalanmadığımız dalga enerjisinden limanlarda elektrik üretmek mümkündür.Dalga enerjisinin uygulamada pek çok tipi vardır .Bunlardan biri titreşen su kolonu olanıdır.

Bu konuda (İlkışık,1988). doktora tez çalışması olarak yapılan " Dikey dairesel silindirik açık su havuzlarında hidrodinamik kuvvetler .." başlıklı

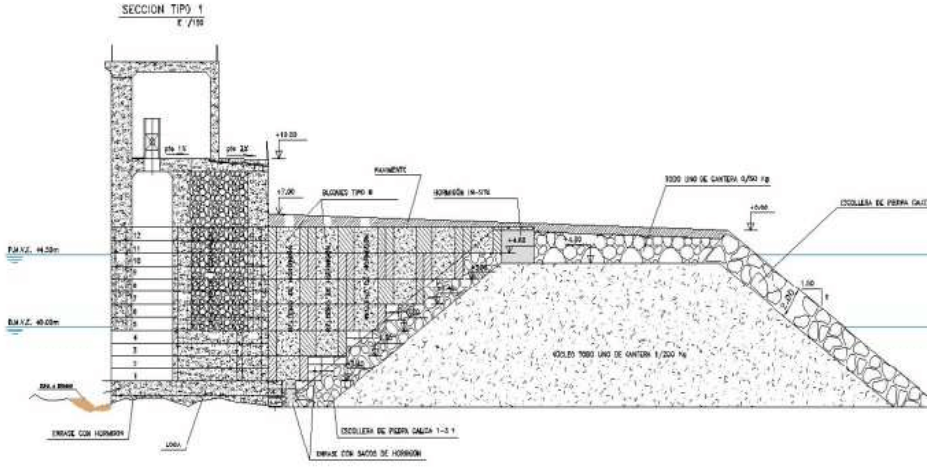
çalışma esas alınarak kıyıda da dalga enerjisinden elektrik elde etmek mümkündür



Kıyıda yapılan ilk örneği İspanya Bask bölgesindeki Mutriki dalga enerjisi santrali bir dalgakırana kurulan çok türbinli tesisdir.400m uzunlukta bir dalgakırana monte edilen bu sistemde derinlik 2 m den başlayıp 17 m derinliğe giden bir dizi odacıklarında dalga hareketiıyle sıkıştırılan hava elektrik enerjisine dönüştürülmektedir.



OWC-Titreşen su kolonu esaslı bu dalga enerji mekanizması dalgaların salınımlı hareketinden faydalanmaktadır.Su seviyesinin altında denize açık,odanın tepesinde bir delik bulunan içi boş bir yapıdan oluşur.



Dalga içeri girdiğinde, su odaya girer ve içerideki havayı sıkıştırır ve bu hava yüksek basınçla üstteki bir açıklıktan dışarı itilir basınçlı hava türbünlerden dolayısıyla alternatörü çalıştırır ve elektrik üretir. Dalga çukurunda ise , aynı

açıklıktan havayı emer ve yine türbini çalıştırır ve bu da elektrik üretmeye devam eder.

Kıyıda dalgakırana yapılan dalga enerjisi sistemleri limanın ve bölgenin elektrik enerjisini saglar ve CO2 emisyonlarını önler ve ormanların korunmasına yardımcı olur.

Toplam yatırım 6,4 milyon avroya mal olmuştur.Yıllık verimi 600.000 kWh dır.

8 SONUÇ



Fosil yakıtların hızlandırdığı iklim değişikliğinden dolayı sıcaklıklar 2050 yılına kadar 1.5-5 derece artacak deniz seviyesi 12-60 inç yükselecektir.Sıfır emisyon şartını sağlayabilmek için denizcilik emisyon azaltma kurallarının yanısıra liman yapımı ve enerji tedarikinde yenilikçi çözümler uygulanmaya konulması gerekmektedir.

Gemi /emisyon miktarının düzenli olarak raporlanması belli bir sınır değerin üzerine çıkmaması saglanmalıdır.Limana gelen gemilerin emisyon ölçümüne göre ceza verilmeli ve belli bir yıldan yaşlı gemilerin limana girişinin yasaklanmalıdır.

Limanlarda atık alım tesislerinde gemilerden alınan sintine ve slaç gibi atıklar susuzlaştırılarak çimento sektöründe kullanılabilir.



Limanlarda lojistik hizmetlerinde karayollarının payının azaltılarak, raylı sistemlere ağırlık verilmesi raylı sistem taşımacılığı ile emisyonların azalmasının yanısıra karayolu trafik yogunlugu da azalacaktır.



- limanlarda yükleme boşaltmanın en verimli biçimde yapılması ve taşınması , depolanmasında AI teknolojilerinden faydalanılarak hem de iş kazalarının önlenmesi açısından robot kullanımı verimli olacaktır.



- Alternatif yakıt ve elektirifikasyonun arttırılması ve liman inşaatında karbon emisyonunu azaltan malzemeler kullanılmalıdır.Bunların başında yeşil çimento ve özel dizaynlı yeşil beton bloklar gelmektedir. Yeşil beton liman yapımında şiddetli dalgalara karşı çeşitli şekillerdeki beton bloklarda kullanılabilir. Yeni nesil beton blokların kullanımı ağırlığın azaltılmasında ve ekipman gereksiminde önemli ölçüde tasarruf saglayacaktır.Boşluklu malzemelerin betonda kullanılması dalga enerjisinin sönümlenmesinde yararlı olacaktır.

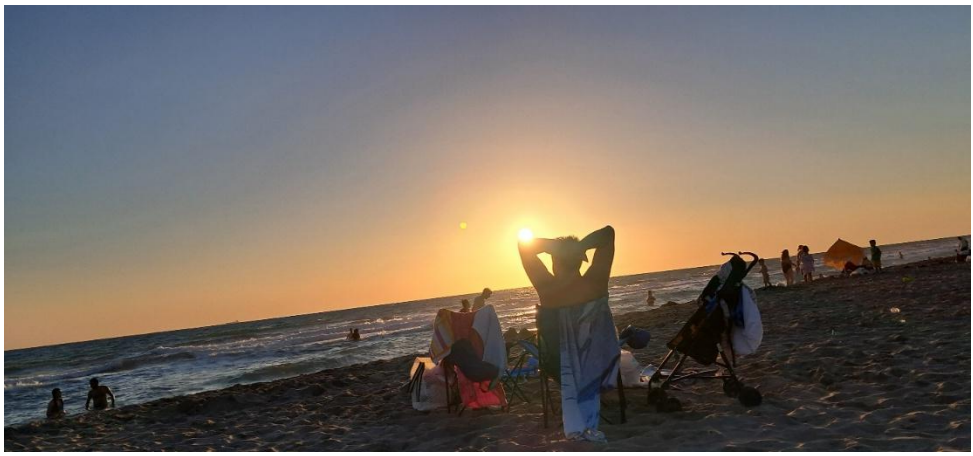
- Xblok beton blokların kaya tipi koruma tabakasına göre enerji verimliliği açısından daha iyi bir performans göstermektedir(Sağ,.M,Özcan.M 2018)



Limanda elektrik alternatif enerji çeşitlerinden dalga enerjisinden saglanabilir.Dalga enerjisinin çeşitli uygulamaları vardır Prof.Mükerrem.F..İlkışık tarafından 1988 yılında İstanbul Teknik Üniversitesinde doktora tez çalışması olarak yapılan " Dikey dairesel silindirik açık su havuzlarında hidrodinamik kuvvetler .." başlıklı çalışma esas alınarak kıyıda da dalga enerjisinden elektrik elde etmek mümkündür .Sıg su derinliğinde yüzer sistemde farklı peryodlarla salınım yapan matematik modelde deneyi yapılarak oluşturduğu su yüzeyi formasyonu yazıcı osilograf yardımıyla belirlenmiştir.Basınç değerleri yüzeye yerleştirilen transdüserler analog digital bilgisayara bağlanarak ortalama basınç değerleri bulunmuştur.Bu sistem çoklu olarak dalgakıranda inşa edilerek elektrik enerjisi elde edilebilir.

Üç tarafı denizlerle çevrili ülkemizde yenilenebilir enerji kaynaklarından dalga enerjisinden daha çok faydalanmalıyız . Elde edilen enerji marinalardan başlayarak yatlar ve kıyı tesisinin ihtiyaçları için kullanılabilir .Turizm bölgelerinde limanların çevreyi kirletmeleri de önlenmiş olur.Emisyonların kontrolu ile halk sağlığı korunmuş olur.

.



Denizlerimizi kirletmeyelim bize huzur veren kaynakları koruyalım

9.KAYNAKLAR

Bass Reedijk,Pieter ,Bakker2004 Introduction of the Xbloc Breakwater Armour Unit,delta marine netherland

Bakker P., van den Berge A., Hakenberg R., Klabbers M., Muttray M., Reedijk B., Rovers I., 2003, Development of Concrete Breakwater Armour Units, Delta Marine Consultants, Hollanda

Burcharth, Jensen, Liu, Meer, D'Angremınd, 1995, Design Formula for Tetrapod Breakage CLI, 2009. Advantages of the CLI Single Layer System Accropode in Comparison with the Tetrapod Double Layers System.

DMC, 2014, Guidelines for Xbloc Concept Designs. Delta Marine Consultants, Hollanda

Giraudel C., Garcıa N., Ledoux S., 2014, Single-Layer Breakwater Armouring: Feedback on the Accropode Technology From Site Experıence

Ilkısık,Mükerrem Fatma 2023 liman şehirlerinde gemilerden kaynaklanan hava kirliliğinin önlenmesi,12.ulusal lojistik ve tedarik kongresi Tarsus Üniversitesi

Muttray M., & Reedijk B., 2008, Design of Concrete Armour Layers. Delta Marine Consultants, Hollanda

Oever E. T., Verhagen, H. J., Klabbers M., & Reedijk B., 2006, Theoretical and Experimental Study on the Placement Of Xbloc Armour Units

Pearson J., Van der Meer J. W., Bruce T., & Franco L., 2005, Overtopping Performance of Different Armour Units for Rubble Mound Breakwaters

Delta Marine Consultants, Gouda, the Netherlands 2 Delta Marine Consultants Singapore, Singapore

Sağ,M,Özcan.M Ülkemizde ilk X-Blok uygulama örneği:Filyos limanı Dalgakıranı

Van der Meer, J.W. 1988. Rock slopes and gravel beaches under wave attack, Doctoral Thesis. Delft University of Technology, No. 396, Delft.

Yağcı, O. ve S. Kabdaşlı. 2003. Alternative placement technique for antifer blocks used on breakwaters. Ocean Engineering 30 (1), 1433-1451. Yalçıner, A.C., A. Ergin, I.C. Kahyaoğlu ve H. Yüncü. 1999. 3D experimental study on the stability

