

**DECEMBER '25**

**MÜHENDİSLİK ALANINDA  
ULUSLARARASI DERLEME,  
ARAŞTIRMA VE ÇALIŞMALAR**



**EDİTÖRLER  
PROF. DR. SELAHATTİN BARDAK  
DOÇ. DR. YILDIZ ŞAHİN**

**Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • C. Cansın Selin Temana**

**Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Serüven Yayınevi**

**Birinci Basım / First Edition • © Aralık 2025**

**ISBN • 978-625-8559-67-5**

**© copyright**

Bu kitabın yayın hakkı Serüven Yayınevi'ne aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz. The right to publish this book belongs to Serüven Publishing. Citation can not be shown without the source, reproduced in any way without permission.

**Serüven Yayınevi / Serüven Publishing**

**Türkiye Adres / Turkey Address:** Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

**Telefon / Phone:** 05437675765

**web:** www.seruyenyayinevi.com

**e-mail:** seruyenyayinevi@gmail.com

**Baskı & Cilt / Printing & Volume**

Sertifika / Certificate No: 47083

MÜHENDİSLİK ALANINDA  
ULUSLARARASI DERLEME,  
ARAŞTIRMA VE ÇALIŞMALAR

EDİTÖRLER

**PROF. DR. SELAHATTİN BARDAK**

**DOÇ. DR. YILDIZ ŞAHİN**



## İÇİNDEKİLER

### Bölüm 1

**Mikroplastik Kirliliğinin Atıksu Arıtma Sistemlerinde Giderilmesi için Yenilikçi Teknolojiler**

*Mahmut SOYLU—1*

### Bölüm 2

**DENİZ DİBİ TARAMADA DİJİTALLEŞME: OTONOM SİSTEMLER VE VERİ TABANLI YÖNETİM**

*Erdal KAŞIKCI, Meltem EKEN —19*

### Bölüm 3

**TÜRKİYE'DE SU AYAK İZİ KAVRAMI VE ÖNEMİ**

*Abdullah YİNANÇ —49*

### Bölüm 4

**BOYARMADDE GİDERİMİNDE MİKROBİYAL ENZİMLER: BİYOKATALİTİK MEKANİZMALAR VE SÜRDÜRÜLEBİLİR STRATEJİLER**

*Sevil ÇALIŞKAN ELEREN —65*

### Bölüm 5

**G20 ÜLKELERİNİN EKOLOJİK AYAK İZİ PERFORMANSININ CRITIC VE VIKOR YÖNTEMLERİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ**

*Fulya ZARALI, Neslihan DEMİREL—81*

### Bölüm 6

**Elektro-Oksidasyon Prosesi ile İlaç Etken Madde Giderimine Genel Bir Bakış**

*Mahmut SOYLU—99*

## Bölüm 7

### SÜRDÜRÜLEBİLİR KENTLEŞMEDE GÜN IŞIĞI: TOPLU KONUT ALANLARINDA GÜNEŞLENME SÜRESİ ANALİZİ

*Ahmet USLU—113*

## Bölüm 8

### FONKSİYONEL ve SÜRDÜRÜLEBİLİR TEKSTİL YÜZEYLERİ İÇİN YENİLİKÇİ DOĞAL BOYAMA YAKLAŞIMLARI

*Gamze GÜLŞEN BAKICI, Deniz Mutlu ALA—125*

## Bölüm 9

### Erzurum - Aziziye – Özbek Köyü Arazi Topplulaştırma Projesinin Teknik Analizi

*Erman BENGİN—145*

## Bölüm 10

### Membran Üretiminde Poliviniliden Florür (PVDF) ve Polieter Sülfon (PES) Türevi Polimerlerin Kullanımı

*Aysel AYDIN KOCAEREN, Emine ÇELEBİ—155*

## Bölüm 11

### FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELER: TERMODİNAMİK TEMELLER, SINIFLANDIRMA VE MÜHENDİSLİK UYGULAMALARI

*Büşra ARSLAN, Levent Cenk KUMRUOĞLU—165*

## Bölüm 12

### GEMİ İNŞA SEKTÖRÜNDE ANA MAKİNE SEÇİMİ İÇİN VIKOR YÖNTEMİNE DAYALI ÇOK KRİTERLİ BİR DEĞERLENDİRME

*Yıldız Şahin, Musa Padır, Ahmet Üçüncü—187*

## Bölüm 13

### OLAY YERİ GÖRÜNTÜLEMEDE DİJİTAL DÖNÜŞÜM: FOTOGRAMETRİDEN LİDARA MEKANSAL VE SPEKTRAL SENTEZ

*Burak YEDEKÇİ, Özlem DEMİRCAN—201*

## Bölüm 14

### Lİ BATARYA GERİDÖNÜŞÜMÜNDE YASAL VE ÇEVRESEL GEREKLİLİKLER

*Esra Kılavuz, Gülşah Germen Tutaş—217*

## Bölüm 15

### GÜNÜMÜZDE ENDÜSTRİ 4.0 - YAPAY ZEKA İLİŞKİSİ VE ÖNEMİ: SEKTÖREL İNCELEME

*KASIM BAYNAL, ESRA DEMİR —237*

## Bölüm 16

### Enerji Üretiminde Nanoteknolojik Sistemler: Malzeme Tasarımı, Temel Mekanizmalar ve Yeni Nesil Uygulamalar

*Zehra Nur OZER—261*

## Bölüm 17

### ÜRETİM YÜRÜTME SİSTEMLERİ (MES) VE ENDÜSTRİ 4.0: TEKSTİL VE HAZIR GİYİM SEKTÖRÜNDE DİJİTAL DÖNÜŞÜM

*ALİME ASLI İLLEEZ —275*

## Bölüm 18

### Polimer Kompozitlerin Empedans Değeri Üzerinde Frekans, Voltaj ve Grafenin Etkisinin Merkezi Kompozit Tasarımı ile İncelenmesi

*Güzin PIHTILI YILDIZ—283*

## Bölüm 19

### KIRSAL ALANLARIN DİJİTAL DÜNYASI: WEB TABANLI 3B GÖRSELLEŞTİRME VE ETKİLEŞİM

*Ahmet USLU —293*

## Bölüm 20

### BARAJ VE TÜNEL PROJELERİNDE SU YALITIMI İÇİN KİMYASAL ENJEKSİYON UYGULAMALARI

*Veli KESKİN —307*





//

# Bölüm 1

## MİKROPLASTİK KİRLİLİĞİNİN ATIKSU ARITMA SİSTEMLERİNDE GİDERİLMESİ İÇİN YENİLİKÇİ TEKNOLOJİLER

*Mahmut SOYLU<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> (Öğr. Gör. Dr.) Iğdır Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu Çevre Sağlığı Programı, ORCID ID:0000-0002-8410-8822

## 1. Giriş

Sentetik polimer kökenli ve boyutları 5 milimetreden daha küçük olan mikroplastikler (MP), günümüz çevre sorunları arasında en yaygın ve uzun ömürlü kirleticilerden birisi olarak değerlendirilmektedir. Bu kirletici maddeler, iki farklı şekilde ortaya çıkmaktadır: İlk olarak, kozmetik ve kişisel bakım ürünlerinde kullanılan mikroboncuklar gibi doğrudan üretilen birincil MP'ler; ikinci olarak ise, büyük boyutlu plastik ürünlerin fiziksel, kimyasal ve biyolojik bozunma süreçleri sonucunda meydana gelen ikincil MP'ler (Li, Liu, & Chen, 2018; Dayal, Kumar, & Verma, 2024). Son yetmiş yılda plastik üretimindeki üstel artış ve 2023 itibarıyla yıllık küresel üretimin 400 milyon metrik tonun üzerine çıkması, bu kirleticilerin çevrede birikmesini kaçınılmaz bir hal almıştır (Plastics Europe, 2023). Bugün MP'ler, Himalayalar'ın en yüksek noktalarından okyanus diplerinin en karanlık bölgelerine, kutuplardaki buz tabakalarından insan vücudunun kan dolaşımı ve plasentasına kadar neredeyse tüm ekosistemlerde saptanmaktadır (Dawson et al., 2021; Ragusa et al., 2021; Puteri et al., 2025). Bu evrensel yaygınlık, MP kirliliğinin acil ve kapsamlı çözümler gerektiren küresel bir çevre krizi olduğunu ortaya koymaktadır.

Mikroplastiklerin ekosistemler ve canlı organizmalar üzerindeki olumsuz etkileri çok boyutludur. Su ortamlarında yaşayan canlılar, mikroskobik alg topluluklarından büyük deniz memelilerine kadar geniş bir yelpazede, bu partikülleri besin maddesi zannetmekte ve bünyelerine almaktadır. Bu yanlış beslenme davranışı, organizmalarda fiziksel yaralanmalardan beslenme düzensizliklerine ve üreme kapasitesinde azalmaya kadar çeşitli sorunlara yol açmaktadır (Gallo, Fossi, Weber, & Panti, 2018; Ma et al., 2024). Daha kritik bir boyut olarak, MP'lerin besin ağı içerisinde yukarı doğru transfer olması ve üst düzey tüketicilerde biyokonsantrasyon göstermesi söz konusudur. Bunun yanı sıra, MP'lerin su itici yüzey özellikleri nedeniyle, PAH ve PCB gibi kalıcı organik kirleticiler ile ağır metal iyonlarını adsorbe ederek bu zararlı maddelerin çevrede taşınmasına aracılık ettiği bilinmektedir (Rochman et al., 2013; Witsø et al., 2024). Son dönem araştırmalar, MP'lerin insan sağlığına yönelik tehditlerini de gündeme getirmektedir. Özellikle MP'lerin kan-beyin engelini geçebilme ve sinir sistemi üzerinde toksik etkiler oluşturabilme kapasitesinin tespit edilmesi, bu konudaki kaygıları daha da derinleştirmiştir (Gençağ, 2025).

Kentsel yerleşimler ve sanayi tesislerinden kaynaklanan atıksular, MP'lerin tatlısu ve deniz ekosistemlerine ulaşmasında başlıca taşıma yollarından birisini oluşturmaktadır. Atıksu arıtma tesisleri (AAT), özgün tasarımları gereği MP giderimi hedeflememelerine karşın, çökeltme ve biyolojik parçalama gibi işlemler vasıtasıyla gelen MP yükünün önemli bir bölümünü (%70-99 aralığında) arıtma çamurunda tutabilme kapasitesine sahiptir (Carr, Liu, & Tesoro, 2016; Ormaniec et al., 2024). Bununla birlikte, tesislere ulaşan MP miktarının son derece yüksek olması sebebiyle, arıtılmış su deşarjları aracılığıyla günlük bazda milyarlarca MP parçacığının alıcı ortamlara verildiği gerçeği değişmemektedir. Bu durum, AAT'leri MP kirliliği açısından önemli bir nokta kaynak haline dönüştürmektedir (Murphy, Ewins, Carbonnier, & Quinn, 2016; Cavazzoli et al., 2025).

Üç yönden denizlerle çevrili coğrafi konumu ve önemli bir plastik üretim ve tüketim merkezi olması nedeniyle Türkiye, MP kirliliği tehdidiyle yoğun biçimde yüzleşmektedir. Ulusal düzeyde

gerçekleştirilen bilimsel çalışmalar, ülke kıyılarının ve iç su kaynaklarının MP kirliliğinden ciddi şekilde etkilendiğini kanıtlamaktadır. Özellikle Akdeniz Havzası, küresel ölçekte en yüksek kirlilik seviyelerine sahip denizler arasında yer almakta ve Türkiye kıyılarında yapılan saha çalışmaları bu tespiti desteklemektedir. Dalyan-İztuzu kıyı bölgesinde gerçekleştirilen bir çalışmada, deniz kaplumbağalarının üreme alanlarında kayda değer düzeyde MP birikimine rastlanmıştır (Zilifli & Tuncer, 2021). Benzer biçimde, Ege ve Akdeniz sahillerinde yürütülen kapsamlı bir incelemede, turizm ve endüstriyel aktivitelerin yoğun olduğu bölgelerde MP kirliliğinin alarm verici seviyelere ulaştığı saptanmıştır (Yakut, 2025). Karadeniz kıyı şeridinde, Giresun ilinde yapılan bir çalışmada ise sahil kumlarında kilogram başına 72,22 adet, deniz suyunda ise litre başına 0,12 adet MP tespit edilerek kirliliğin bölgesel yaygınlığı ortaya konmuştur (Kayar & Uncumusaoğlu, 2024). Bu bulgular, Türkiye'nin deniz ekosistemlerinin acil koruma tedbirleri ve müdahale stratejileri gerektirdiğini açıkça göstermektedir (Soysal, 2024).

Türkiye'deki MP kirliliğinin kaynaklarına odaklanan araştırmalar, AAT'lerin bu problemde önemli bir pay sahibi olduğunu ortaya koymaktadır. Ülke genelinde farklı bölgelerde yapılan çalışmalarda, AAT giriş ve çıkış sularındaki MP seviyeleri incelenmiştir. Akarsu ve arkadaşları (2017) tarafından gerçekleştirilen ve Türkiye'de bu alanda öncü niteliğindeki çalışmada, bir evsel AAT'nin MP tutma verimliliğinin yaklaşık %72 düzeyinde olduğu, ancak arıtılmış su deşarjları ile yine de önemli miktarda MP'nin sucül çevreye karıştığı belirlenmiştir. Daha güncel araştırmalar, bu sonuçları doğrulamakta ve farklı coğrafi bölgelerdeki AAT'lerin de benzer şekilde MP kaynağı olarak işlev gördüğünü göstermektedir (Bozdaş & Ateş, 2020). Örneğin, Rize ilindeki AAT'lerde yapılan bir incelemede, yüksek yağış alan bu bölgede dahi AAT çıkış sularının MP kirliliğine katkıda bulunduğu tespit edilmiştir (Akdemir & Çelik, 2023). Bu durum, mevcut geleneksel arıtma sistemlerinin MP'leri tamamen uzaklaştırmada yetersiz kaldığını ve arıtılmış suların yeniden kullanımı veya deşarjı öncesinde daha gelişmiş arıtma teknolojilerine ihtiyaç duyulduğunu net bir şekilde ortaya koymaktadır (Akarsu, 2022; Asadi et al., 2025).

Bu derleme çalışmasının temel hedefi, geleneksel AAT'lerin sınırlılıkları ve MP kirliliğinin giderek büyüyen tehdidi göz önüne alındığında, atıksulardan MP'lerin uzaklaştırılması amacıyla geliştirilen yenilikçi teknolojileri detaylı bir şekilde değerlendirmektir. Bu kapsamda, ileri düzey membran sistemleri, nanomateryal temelli uygulamalar, enzimatik parçalama yöntemleri, ileri oksidasyon prosesleri ve elektrokimyasal teknikler gibi güncel yaklaşımlar incelenecektir. Her bir teknolojinin işleyiş mekanizması, güçlü ve zayıf yönleri ile uygulama potansiyeli, hem uluslararası hem de ulusal literatürdeki en güncel araştırmalar ışığında ele alınacaktır. Bu çalışma ile Türkiye'deki bilim insanlarına, politika belirleyicilere ve çevre mühendislerine MP kirliliğiyle mücadelede kullanılabilecek gelecek vaat eden teknolojiler hakkında güncel ve bütüncül bir perspektif sunulması amaçlanmaktadır.

## 2. Mikroplastiklerin Kaynakları ve Atıksu Sistemlerine Girişi

Mikroplastik (MP) kirliliğinin etkin bir şekilde yönetilebilmesi, öncelikle bu kirleticilerin çevreye hangi yollarla ve ne miktarda dahil olduğunun anlaşılmasını gerektirir. MP'ler, kökenlerine göre temel olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır: birincil ve ikincil mikroplastikler. Birincil MP'ler,

endüstriyel olarak doğrudan mikro boyutlarda üretilen plastik parçacıklarıdır. İkincil MP'ler ise, daha büyük boyutlu plastik atıkların (makroplastikler) zamanla çevresel koşulların etkisiyle fiziksel, kimyasal ve biyolojik olarak parçalanması sonucu oluşan fragmanlardır (Bozdaş & Ateş, 2020). Her iki kaynak türü de kentsel ve endüstriyel faaliyetler neticesinde büyük ölçüde atıksu akımlarına karışarak, atıksu arıtma tesislerini (AAT) bu kirleticiler için ana toplama ve deşarj noktalarından biri haline getirmektedir (Talukdar et al., 2024). Bu bölümde, MP'lerin temel kaynakları ve atıksu sistemlerine giriş mekanizmaları detaylı bir şekilde incelenmektedir.

## 2.1. Birincil Mikroplastik Kaynakları

Birincil MP'ler, kasıtlı olarak küçük boyutlarda üretilen ve genellikle belirli bir amaca hizmet eden plastiklerdir. Bu kategorideki en bilinen kaynaklardan biri, geçmişte yaygın olarak kullanılan kişisel bakım ve kozmetik ürünleridir. Diş macunları, yüz temizleyicileri ve peeling ürünleri gibi formülasyonlarda aşındırıcı veya dolgu maddesi olarak kullanılan polietilen (PE) veya polipropilen (PP) bazlı mikrobuncuklar, kullanımları sonrası doğrudan evsel atıksuya karışmaktaydı. Birçok ülkede bu tür ürünlerin yasaklanmasına yönelik adımlar atılmış olsa da, hala bazı bölgelerde ve ürün gruplarında bu kaynak önemini korumaktadır.

Endüstriyel faaliyetler de önemli bir birincil MP kaynağıdır. Plastik endüstrisinde ham madde olarak kullanılan ve "nurdle" olarak da bilinen üretim peletleri, üretim ve taşıma süreçlerindeki sızıntılar yoluyla çevreye karışabilmektedir. Benzer şekilde, sentetik kumlama gibi endüstriyel yüzey temizleme işlemlerinde aşındırıcı olarak kullanılan plastik granüller de bir diğer birincil MP kaynağıdır. Bu endüstriyel kaynaklı MP'ler, fabrika deşarjları veya kaza sonucu dökülmelerle doğrudan su kaynaklarına veya atıksu sistemlerine ulaşabilmektedir.

## 2.2. İkincil Mikroplastik Kaynakları ve Atıksu Sistemlerindeki Hakimiyeti

Atıksu arıtma tesislerine ulaşan MP yükünün büyük bir çoğunluğunu ikincil MP'ler oluşturmaktadır. Bu parçacıklar, günlük hayatta kullandığımız sayısız plastik ürünün kullanımı ve yıpranması sonucu ortaya çıkar.

### 2.2.1. Sentetik Tekstil Ürünlerinin Yıkınması

Modern yaşamın vazgeçilmezi olan polyester, naylon, akrilik vb. sentetik kumaşlardan üretilmiş giysiler, evsel atıksudaki MP kirliliğinin en baskın kaynağı olarak kabul edilmektedir. Çamaşır makinelerinde yıkama sırasında, mekanik ve kimyasal stres altında bu giysilerden milyonlarca mikroskobik lif (mikrofiber) koparak atıksuya karışmaktadır (Le et al., 2022). Yapılan bilimsel çalışmalar, tek bir yıkama işleminde 120 – 730 bin arasında mikrofiberin salınabildiğini ortaya koymuştur (Vassilenko et al., 2021). Ormaniec ve arkadaşları (2024) tarafından yapılan bir araştırma, AAT giriş suyundaki MP'lerin büyük çoğunluğunun tekstil lifleri olduğunu doğrulamıştır. Bu liflerin boyutu, şekli ve polimer türü, kullanılan kumaşın yapısına, yıkama sıcaklığına ve kullanılan

deterjanın türüne göre değişiklik gösterebilmektedir. Bu durum, evsel atıksuyu özellikle mikrofiber kirliliği için sürekli ve yaygın bir kaynak haline getirmektedir.

### 2.2.2. Araç Lastiklerinin Aşınması (TWP)

Karayolu trafiği, genellikle göz ardı edilen ancak hacimsel olarak en büyük MP kaynaklarından birini oluşturur. Araç lastikleri, sentetik kauçuk ve çeşitli polimer katkı maddelerinden üretilmektedir. Sürüş sırasında lastiklerin yol yüzeyi ile sürtünmesi sonucu ortaya çıkan aşınma, “Tire Wear Particles” (TWP) olarak adlandırılan binlerce mikroplastik parçacığın çevreye yayılmasına neden olur. Bu parçacıklar, yağmur suyu ile birlikte yol kenarlarından ve drenaj sistemlerinden yıkanarak doğrudan nehirlere karışabilir veya kentsel yağmur suyu kanalizasyon sistemleri aracılığıyla atıksu arıtma tesislerine ulaşabilir. Özellikle yoğun trafikli kentsel alanlarda, yağmur suyu akışı, AAT'lere önemli miktarda TWP taşıyarak MP yükünü artıran kritik bir yol olarak öne çıkmaktadır.

### 2.2.3. Diğer İkincil Kaynaklar ve Kentsel Akış

Yukarıda belirtilen ana kaynakların yanı sıra, kentsel ortamdaki sayısız plastik ürünün parçalanması da ikincil MP oluşumuna katkı sağlar. Plastik poşetler, ambalaj malzemeleri, tek kullanımlık kaplar ve sigara izmaritleri gibi atıklar, güneş ışığı (UV radyasyon), rüzgar ve suyun etkisiyle zamanla gevrekleşerek daha küçük parçalara ayrılır. Bu fragmanlar, rüzgarla veya yağmur suyuyla taşınarak atıksu sistemlerine dahil olabilir. Boyalar, yol işaretleri ve bina kaplamaları gibi polimer bazlı yüzeylerin aşınması da bir diğer önemli ikincil MP kaynağıdır. Bu kaynaklardan gelen MP'ler, genellikle kentsel yüzey akışı ile taşınır ve birleşik kanalizasyon sistemlerinin bulunduğu bölgelerde doğrudan AAT'lere yönlendirilir.

## 2.3. Atıksu Arıtma Tesislerine Giriş Yolları

MP'lerin AAT'lere girişi, evsel atıksu, endüstriyel atıksu ve yağmur suyu ya da kentsel akış olmak üzere temel olarak üç ana yol üzerinden gerçekleşir.

- **Evsel Atıksu:** Bu yol, kişisel bakım ürünlerinden gelen birincil MP'leri ve özellikle sentetik tekstillerin yıkanmasından kaynaklanan mikrofiberleri içerir. Günlük evsel faaliyetler, bu yolu en sürekli ve hacimli MP giriş rotası haline getirir (Hu et al., 2024).
- **Endüstriyel Atıksu:** Tekstil, plastik üretimi, kozmetik ve boya gibi endüstrilerin deşarjları, hem üretim peletleri, granüller gibi birincil MP'leri hem de proses kaynaklı lifler, parçacıklar gibi ikincil MP'leri yüksek konsantrasyonlarda içerebilir. Bu deşarjlar, genellikle ön arıtmaya tabi tutulsa da, önemli miktarda MP'yi belediye kanalizasyon sistemine taşıyabilir (Long et al., 2021).

- **Yağmur Suyu ve Kentsel Akış:** Özellikle birleşik kanalizasyon sistemlerinin (yağmur suyu ve evsel atıksuyun aynı kanalda toplandığı sistemler) bulunduğu şehirlerde, yağmur suyu akışı atmosferden, yollardan (lastik aşınması), binalardan ve diğer kentsel yüzeylerden topladığı MP'leri doğrudan AAT'lere taşır (Werbowski et al., 2021; Sewwandi, Wijesekara, Rajapaksha, & Vithanage, 2024). Bu yol, özellikle yoğun yağış dönemlerinde AAT'lere ani ve yüksek miktarda MP yükü gelmesine neden olabilir.

Sonuç olarak, atıksu arıtma tesisleri, modern kentsel yaşamın bir yan ürünü olan mikroplastik kirliliğinin toplandığı bir merkez konumundadır. Bu tesislere giren MP'lerin kaynaklarının ve giriş yollarının doğru bir şekilde anlaşılması, mevcut arıtma sistemlerinin performansını değerlendirmek ve gelecekteki daha etkili giderim stratejilerini geliştirmek için temel bir ön koşuldur.

### 3. Konvansiyonel Atıksu Arıtma Sistemlerinde Mikroplastik Giderimi

Kentsel ve endüstriyel atıksu deşarjları, mikroplastiklerin (MP) sucul ekosistemlere yayılmasında birincil taşıma yolu olarak kabul edilmektedir. Dünya genelinde faaliyet gösteren on binlerce atıksu arıtma tesisi (AAT), temel olarak askıda katı madde, organik kirleticiler ve besin maddelerini giderme amacıyla tasarlanmış olup, MP'leri spesifik olarak hedefleyen bir arıtma ünitesine sahip değildir (Iyare, Ouki, & Bond, 2020; Ma et al., 2024). Buna karşın, geleneksel AAT'lerde bulunan fiziksel ve biyolojik arıtma kademeleri, tesadüfi bir şekilde MP'lerin önemli bir bölümünü tutarak bu kirleticiler için birincil bir engel oluşturmaktadır. Ancak bu tutulma süreci tam verimli olmadığından, AAT'ler arıtılmış deşarj suları vasıtasıyla MP'ler için önemli birer noktasal kaynak olarak faaliyet göstermeye devam etmektedir. Bu bölümde, konvansiyonel AAT'lerin farklı arıtma aşamalarındaki MP tutma mekanizmaları, verimlilik düzeyleri ve bu süreçlerin Türkiye özelindeki yansımaları, güncel bilimsel literatür ve ulusal çalışmalar temel alınarak incelenmektedir.

#### 3.1. Arıtma Kademeleri ve Giderim Mekanizmaları

Geleneksel bir AAT, genellikle birincil, ikincil ve üçüncül olmak üzere üç ana arıtma aşamasından meydana gelir. MP giderimi, bu aşamaların her birinde farklı fiziksel ve biyolojik mekanizmalar aracılığıyla gerçekleşir. Birincil arıtma, büyük katıların ve askıda maddelerin mekanik olarak uzaklaştırıldığı ilk aşamadır. Bu kademede ızgaralar, kum ve yağ tutucular ile birincil çökeltim tankları bulunur. Özellikle ızgaralar, büyük plastik parçalarını ve MP kümelerini tutarken, çökeltim tankları daha yoğun yapıdaki MP'lerin yerçekimi kuvvetiyle çökmesini sağlar (Carr, Liu, & Tesoro, 2016). Güncel çalışmalar, birincil arıtmanın tek başına gelen MP yükünün %50 ila %98 gibi geniş bir aralıkta giderilebildiğini, ancak ortalama olarak %70-80 bandında bir verim sergilediğini göstermektedir (Miino et al., 2024; AlShamaileh, E., & Alzoubi, 2025).

İkincil arıtma, çözünmüş organik maddelerin mikroorganizmalar tarafından biyolojik olarak parçalandığı aktif çamur sürecini temel alır. Bu aşama, MP gideriminin en verimli olduğu kademelerden biridir. Aktif çamur prosesinde, mikroorganizmaların oluşturduğu biyolojik floklar, MP'ler için birer yapışma ve tutunma yüzeyi oluşturur. MP'ler, bu flokların içine hapsolarak veya

yüzeylerine yapışarak daha büyük ve yoğun kümeler (heteroagregatlar) meydana getirir (Crosset-Perrotin et al., 2025). Bu mekanizma, MP'lerin biyokütle ile birlikte çöktürülerek sistemden uzaklaştırılmasını büyük ölçüde kolaylaştırır (Kwon, Kim, Henkel, Todt, & Choi, 2022). Aktif çamur prosesini içeren ikincil arıtma sistemlerinin MP tutma verimliliği genellikle %85-95 aralığında rapor edilmektedir (Iyare et al., 2020).

Üçüncül (ileri) arıtma ise, deşarj suyu kalitesini daha da artırmak amacıyla uygulanan ek işlemleri içerir. Bu aşamada kum filtreleri, disk filtreler, membran filtrasyon (ultrafiltrasyon/nanofiltrasyon) veya dezenfeksiyon gibi teknolojiler kullanılabilir. Özellikle filtrasyon temelli üçüncül arıtma üniteleri, ikincil arıtmadan kaçmayı başaran daha küçük boyutlu MP'lerin tutulmasında oldukça yüksek bir performans sergiler. Bu nedenle, üçüncül arıtmaya sahip tesislerin toplam MP giderim verimliliği genellikle %95'in üzerine çıkmakta, hatta bazı durumlarda %99'u aşabilmektedir (Cristaldi et al., 2020; Asadi et al., 2025). Ancak, bu yüksek verimlilik oranları dahi, özellikle büyük nüfuslu metropoliten alanlardaki AAT'lerden her gün milyonlarca MP parçacığının çevreye salınmasını önleyememektedir.

### 3.2. Giderim Verimliliğini Etkileyen Faktörler

AAT'lerin MP tutma performansı, bir dizi değişkene bağlı olarak önemli farklılıklar gösterebilir. Bu değişkenlerin başında, tesisin sahip olduğu arıtma teknolojisinin seviyesi gelmektedir (Al-Amri et al., 2024). İleri arıtma ünitelerine sahip tesisler, beklendiği üzere daha yüksek giderim verimliliği sunmaktadır. Bununla birlikte, gelen atıksudaki MP'lerin fiziksel ve kimyasal nitelikleri de verimliliği doğrudan etkilemektedir. Özellikle MP'lerin boyutu, şekli ve yoğunluğu, giderim mekanizmalarının etkinliğinde kritik bir rol oynamaktadır.

Boyut, en belirleyici faktörlerden biridir. 300 µm'den büyük MP'ler fiziksel işlemlerle (ızgara, çöktürme) kolayca tutulabilirken, 100 µm'den küçük partiküllerin ve özellikle lif formundaki MP'lerin sistemden kaçma olasılığı daha yüksektir (Blair, Waldron, Phoenix, & Gauchotte-Lindsay, 2019). Lifler, düşük yoğunlukları ve geniş yüzey alanları nedeniyle çöktürme tanklarında daha uzun süre askıda kalma ve biyolojik floklara tutunma eğilimlerinin daha düşük olması gibi özellikler sergiler. Bu sebeple, AAT çıkış sularında en sık rastlanan MP türü genellikle liflerdir ve toplam MP'lerin %60-70'ini oluşturabildikleri rapor edilmektedir (Blair et al., 2019).

Polimer tipi ve yoğunluğu da çökme davranışını etkileyen diğer önemli bir faktördür. Polietilen (PE) ve polipropilen (PP) gibi sudan daha düşük yoğunluğa sahip polimerler su yüzeyinde yüzme eğilimindeyken, polivinil klorür (PVC) ve polietilen tereftalat (PET) gibi daha yoğun polimerler çökme eğilimindedir. Bu durum, farklı polimer türlerinin farklı arıtma ünitelerinde (yüzey sıyrıcılar veya çöktürme tankları) tutulmasına yol açar. Ayrıca, hidrolik bekletme süresi, çamur yaşı ve mevsimsel sıcaklık değişimleri gibi operasyonel koşullar da AAT'lerin MP giderim performansı üzerinde etkili olabilmektedir.

### 3.3. Türkiye'deki Atıksu Arıtma Tesislerinin Performansı

Türkiye'deki AAT'lerin MP tutma performansına ilişkin yürütülen çalışmalar, uluslararası literatürle büyük ölçüde uyumlu sonuçlar ortaya koymaktadır. Ülkedeki tesislerin, MP'leri gidermek amacıyla tasarlanmamış olmalarına rağmen, önemli bir engel teşkil ettiği, ancak nihai deşarjların sucül ekosistemler için hala ciddi bir MP kaynağı olduğu doğrulanmıştır (Bozdaş & Ateş, 2020). Akarsu ve arkadaşları (2017) tarafından yapılan ve Türkiye'de bu alandaki ilk çalışmalardan biri olan araştırmada, bir evsel AAT'nin MP tutma verimliliği yaklaşık %72 olarak ölçülmüştür. Bu çalışma, arıtma çamurunun MP'ler için önemli bir birikim noktası olduğunu, ancak arıtılmış suyun da litrede onlarca ila yüzlerce MP içerebildiğini göstermiştir.

Farklı arıtma teknolojilerine sahip tesislerin karşılaştırıldığı daha güncel çalışmalar, beklendiği gibi ileri arıtma proseslerinin önemini vurgulamaktadır. Akarsu (2022), yaptığı derleme çalışmasında, Türkiye'deki birincil ve ikincil arıtmaya sahip tesislerin çıkış sularındaki MP konsantrasyonlarının, ileri arıtma (üçüncül) uygulayan tesislere kıyasla önemli ölçüde daha yüksek olduğunu belirtmiştir. Bu durum, özellikle azot ve fosfor giderimi gibi hedeflerle kurulan ileri arıtma ünitelerinin, dolaylı olarak MP giderimine de büyük katkı sağladığını ortaya koymaktadır. Ancak, bu tesislerin dahi tam bir giderim sağlayamadığı ve deşarj standartlarının MP'leri kapsamaması nedeniyle bu kirliliğin yasal bir zeminde kontrol edilemediği bir gerçektir.

Bölgesel çalışmalar da Türkiye'deki durumu daha net bir şekilde gözler önüne sermektedir. Örneğin, Karadeniz Bölgesi'nde, Rize ilindeki bir kentsel AAT'de yapılan incelemede hem giriş hem de çıkış suyunda yüksek konsantrasyonlarda MP tespit edilmiştir (Akdemir & Çelik, 2023). Bu çalışma, sadece büyük endüstriyel şehirlerin değil, daha küçük yerleşim yerlerindeki AAT'lerin bile önemli birer MP kaynağı olduğunu göstermesi açısından dikkat çekicidir. Genel olarak, Türkiye'deki çalışmalarda tespit edilen MP türleri arasında lifler ve fragmanlar en yaygın olanlarıdır. Bu durum, tekstil endüstrisinin ve sentetik kumaşlardan yapılan giysilerin yıkanmasının, evsel atıksulardaki MP yüküne önemli bir katkı sağladığını düşündürmektedir.

### 3.4. Arıtma Çamurunda Mikroplastik Birikimi: İkincil Kirlilik Riski

Konvansiyonel AAT'lerin MP giderimindeki en önemli sonuçlarından biri, tutulan MP'lerin büyük bir kısmının arıtma çamurunda yoğunlaşmasıdır. Yapılan çalışmalar, AAT'ye giren toplam MP'lerin %90'ından fazlasının son aşamada arıtma çamuruna geçtiğini ortaya koymaktadır (Di Bella et al., 2022; Crosset-Perrotin et al., 2025). Bu durum, AAT'leri MP'ler için bir "havuzdan" ziyade, bir "taşımaya bandına" dönüştürmektedir. Diğer bir deyişle, MP'ler sudan uzaklaştırılmakta, ancak bu kez de katı bir matris olan çamur içinde konsantre edilmektedir.

Arıtma çamurunun bertarafı veya yeniden kullanımı, bu nedenle MP kirliliği döngüsünde kritik bir aşama olarak öne çıkmaktadır. Türkiye'de ve dünyada arıtma çamurları, besin içeriği nedeniyle genellikle tarım arazilerinde gübre olarak kullanılmakta, depolama sahalarına gönderilmekte veya yakılmaktadır. Çamurun tarım arazilerine uygulanması, toprak ekosistemlerinin ve dolayısıyla



karasal besin zincirinin büyük ölçekli MP kirliliğine maruz kalması riskini doğurmaktadır. Toprağa karışan MP'ler, hem toprak canlılarını (solucanlar, mikroorganizmalar vb.) olumsuz etkileyebilir hem de yetiştirilen bitkiler tarafından alınarak insan gıdasına ulaşabilir. Bu durum, sucul ortamdan karasal ortama bir kirlilik transferi yaratarak sorunu daha da karmaşık hale getirmektedir. Bu nedenle, AAT'lerin MP giderim verimliliği değerlendirilirken, sadece artırılmış suyun kalitesi değil, aynı zamanda arıtma çamurunun nihai akıbeti de göz önünde bulundurulmalıdır. Konvansiyonel sistemlerin bu ikincil kirlilik riskini yönetmedeki yetersizliği, yeni ve daha sürdürülebilir arıtma teknolojilerine olan ihtiyacı bir kez daha ortaya koymaktadır (Cavazzoli et al., 2025).

#### 4. Yenilikçi Mikroplastik Giderim Teknolojileri

Konvansiyonel atıksu arıtma sistemlerinin mikroplastikleri (MP) tamamen giderememesi ve arıtma çamurunda biriktirerek ikincil kirlilik riski oluşturması, daha etkili ve sürdürülebilir arıtma teknolojilerine olan ihtiyacı acil bir hale getirmiştir. Son yıllarda, bilim dünyası bu soruna çözüm bulmak amacıyla, mevcut sistemlere entegre edilebilecek veya tamamen yeni yaklaşımlar sunan bir dizi yenilikçi teknoloji üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu teknolojiler, daha yüksek giderim verimliliği, daha küçük boyutlu partikülleri hedefleme ve hatta MP'lerin kimyasal yapısını bozarak zararsız bileşenlere dönüştürme potansiyeli sunmaktadır. Bu bölümde, ileri membran teknolojileri, nanomateryal bazlı uygulamalar, enzimatik degradasyon, ileri oksidasyon prosesleri (AOP), elektrokimyasal yöntemler ve bu teknolojilerin bir arada kullanıldığı hibrit sistemler gibi gelecek vadeden yaklaşımlar, en güncel bilimsel bulgular ışığında incelenmektedir.

##### 4.1. İleri Membran Teknolojileri

Membran teknolojileri, gözenek boyutu kontrolü sayesinde MP'ler için etkili bir fiziksel bariyer oluşturarak yüksek giderim verimliliği sunmaktadır. Konvansiyonel sistemlere kıyasla, özellikle Membran Biyoreaktörler (MBR), aktif çamur prosesini membran filtrasyon ile birleştirerek %99'un üzerinde MP giderim verimliliği sağlamaktadır (Sun et al., 2019). MBR sistemleri, daha küçük ayak izi ve daha yüksek çıkış suyu kalitesi gibi avantajlar sunsa da membran tıkanması en önemli operasyonel zorluk olmaya devam etmektedir. Son yıllarda, bu sorunu aşmak için dinamik membran biyoreaktörler (DMBR) ve seramik membranlar gibi alternatifler geliştirilmiştir. Seramik membranlar, polimerik membranlara göre daha yüksek mekanik dayanıma, kimyasal stabiliteye ve daha uzun ömre sahiptir, bu da onları MP giderimi için daha sürdürülebilir bir seçenek haline getirmektedir (Gürel & Büyükgüngör, 2011). Nanofiltrasyon (NF) ve ters osmoz (RO) gibi daha küçük gözenek çapına sahip membranlar ise nanoplastik boyutundaki (<1 µm) partiküllerin gideriminde dahi yüksek verimlilik sunarak, özellikle suyun yeniden kullanımı uygulamaları için kritik bir rol oynamaktadır (Partal & Kılıç, 2021).

##### 4.2. Nanomateryal Bazlı Teknolojiler

Nanoteknoloji, yüksek yüzey alanı ve benzersiz reaktif özellikleri sayesinde MP giderimi için yenilikçi çözümler sunmaktadır. Manyetik nanopartiküller (MNP), bu alanda en çok araştırılan

materyallerden biridir. Yüzeyleri özel kimyasallarla modifiye edilen MNP'ler, MP'lere bağlanarak manyetik bir alan yardımıyla sudan kolayca ayrıştırılabilen kümeler oluşturur. Laboratuvar çalışmaları, bu yöntemin %90'ın üzerinde bir giderim verimliliği sağlayabildiğini göstermektedir (Esmeray & Gönen, 2017). Grafen oksit (GO) ve karbon nanotüpler (CNT) gibi karbon bazlı nanomateriyaller de geniş yüzey alanları ve güçlü adsorpsiyon kapasiteleri ile öne çıkmaktadır. Bu materyaller, MP'leri yüzeylerinde etkili bir şekilde tutarak sudan uzaklaştırabilir (Ünşar, Pehlivan, & Yıldız, 2016). Ancak, nanomateriyallerin potansiyel çevresel toksisiteleri ve uygulama maliyetleri, bu teknolojilerin geniş ölçekli kullanımının önündeki en önemli engellerdir. Bu nedenle, çevre dostu ve düşük maliyetli nanomateriyallerin geliştirilmesi üzerine yapılan araştırmalar devam etmektedir (Özkaleli & Erdem, 2018).

### 4.3. Enzim Mühendisliği ve Biyolojik Degradasyon

MP kirliliğine yönelik en sürdürülebilir çözümlerden biri, plastik polimerlerini biyolojik olarak parçalayabilen mikroorganizmaların ve enzimlerin kullanılmasıdır. Son yıllarda keşfedilen PETase ve MHETase gibi enzimler, özellikle polietilen tereftalat (PET) polimerini monomerlerine kadar parçalayabilme yetenekleriyle büyük bir heyecan yaratmıştır (Yoshida et al., 2016). Cornell Üniversitesi'nde yapılan güncel bir çalışma, kanalizasyon çamurunda bulunan ve PET'i parçalayabilen yeni enzimler keşfederek bu teknolojinin AAT'lere entegrasyon potansiyelini ortaya koymuştur (Cornell University, 2023). Benzer şekilde, genetiği değiştirilmiş bakterilerin polisitiren gibi belirli plastik türlerini parçalamak üzere programlandığı sentetik biyoloji yaklaşımları da gelecek vaat etmektedir (Engineered bacteria, 2025). Bu biyolojik yöntemler, MP'leri sadece sudan ayırmakla kalmayıp, aynı zamanda onları zararsız bileşenlere dönüştürerek kirliliği kaynağında yok etme potansiyeli taşıması açısından diğer teknolojilerden ayrılmaktadır. Ancak, degradasyon hızının yavaş olması ve farklı polimer türleri için spesifik enzimlerin geliştirilmesi gerekliliği, bu alanın önündeki temel zorluklardır.

### 4.4. İleri Oksidasyon Prosesleri (AOP)

İleri Oksidasyon Prosesleri (AOP), hidroksil radikalleri ( $\bullet\text{OH}$ ) gibi son derece reaktif türler üreterek organik kirleticileri parçalayan kimyasal arıtma yöntemleridir. Ozonlama, Fenton reaksiyonu ( $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$ ), foto-Fenton ve fotokataliz gibi AOP teknikleri, MP'lerin yüzey yapısını değiştirerek veya polimer zincirlerini kırarak parçalanmasını sağlayabilir (Kılıç & Kestioğlu, 2008). Özellikle foto-Fenton prosesinin, en dayanıklı plastik türlerinden biri olan düşük yoğunluklu polietilenin (LDPE) parçalanmasında etkili olduğu gösterilmiştir (Gürtekin, 2014). AOP'ler, MP'leri daha küçük ve potansiyel olarak biyolojik olarak daha kolay parçalanabilir fragmanlara dönüştürebilir. Ancak, bu proseslerin yüksek enerji gereksinimi, kimyasal maliyetleri ve potansiyel olarak zararlı yan ürünler oluşturma riski gibi dezavantajları bulunmaktadır (Sağsöz & Çelik, 2023). Bu nedenle, AOP'lerin genellikle diğer arıtma yöntemleriyle birlikte (hibrit sistemler) veya özel endüstriyel atıksuların arıtımında kullanılması daha uygun görülmektedir (Atmaca & Öztürk, 2022).

#### 4.5. Elektrokimyasal Yöntemler

Elektrokimyasal yöntemler, elektrik akımı kullanarak sudaki kirleticileri gidermeyi amaçlayan bir başka yenilikçi teknoloji grubudur. Elektrokoagülasyon (EC), bu yöntemler arasında en popüler olanıdır. EC prosesinde, demir veya alüminyum gibi kurban elektrotlar kullanılarak suya metal iyonları salınır. Bu iyonlar, su içinde pıhtılaştırıcı (koagülant) görevi görerek MP'leri ve diğer askıda katıları çevreleyip çöktürülebilir floklar oluşturur (Yılmaz & Karagözoğlu, 2019). Elektrokoagülasyon, geniş bir pH aralığında etkili olması, çamur üretiminin az olması ve otomasyona uygun olması gibi avantajlar sunar (Tanyol & Demir, 2017). Elektroflotasyon (EF) ise, suyun elektrolizi ile üretilen mikro-kabarcıkların MP'leri yüzeye taşıyarak uzaklaştırması prensibine dayanır. Bu yöntemler, özellikle endüstriyel atıksulardaki yüksek MP konsantrasyonlarının arıtımında ve diğer teknolojilerle entegre sistemlerde gelecek vaat etmektedir (Özbay, Kılıç, & Genç, 2016; Akkaya & Üçgül, 2023).

#### 4.6. Hibrit Sistemler

MP gideriminde tek bir teknolojinin tüm sorunları çözmesi genellikle mümkün olmadığından, farklı yöntemlerin avantajlarını birleştiren hibrit sistemler giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Örneğin, bir AAT'de koagülasyon ve ardından membran filtrasyonunun (MBR) birlikte kullanılması, hem büyük hem de küçük boyutlu MP'lerin yüksek verimlilikle giderilmesini sağlayabilir. Benzer şekilde, AOP'lerin biyolojik arıtma öncesinde bir ön arıtma adımı olarak kullanılması, biyolojik olarak zor parçalanan plastiklerin yapısını bozarak aktif çamur prosesinin verimliliğini artırabilir. Bitki-esinli filtrasyon sistemlerinin geleneksel kum filtreleriyle birleştirilmesi veya manyetik nanopartiküllerin aktif çamur prosesine entegre edilmesi gibi yenilikçi hibrit yaklaşımlar da araştırılmaktadır (PolyGone, 2024). Bu entegre sistemler, farklı boyut ve tipteki MP'leri hedef alarak daha sağlam, esnek ve yüksek verimli arıtma çözümleri sunma potansiyeline sahiptir ve gelecekteki AAT tasarımlarının temelini oluşturması beklenmektedir.

### 5. Sonuç ve Öneriler

Mikroplastik kirliliği, 21. yüzyılın en acil çevresel sorunlarından biri olarak karşımızda durmaktadır. Bu derleme çalışmasında, atıksu arıtma tesislerinin mikroplastik kirliliği döngüsündeki kritik rolü ve bu kirleticilerin giderilmesine yönelik mevcut ve gelişmekte olan teknolojiler kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

Konvansiyonel atıksu arıtma tesisleri, mikroplastikleri hedef alacak şekilde tasarlanmamış olmalarına rağmen, fiziksel ve biyolojik arıtma kademeleri aracılığıyla önemli miktarda mikroplastığı tesadüfi olarak tutabilmektedir. Ancak, bu giderim verimliliği tam olmaktan uzaktır ve özellikle küçük boyutlu partiküller ile lif formundaki mikroplastikler arıtma sistemlerinden kaçarak sucul ekosistemlere ulaşmaktadır. Türkiye'deki çalışmalar da, ülkemizdeki atıksu arıtma tesislerinin benzer performans gösterdiğini ve deşarj sularının önemli bir mikroplastik kaynağı olduğunu ortaya

koymaktadır. Ayrıca, arıtma çamurunda yoğunlaşan mikroplastiklerin tarımsal uygulamalar yoluyla karasal ekosistemlere taşınması, sorunu daha da karmaşık bir hale getirmektedir.

Bu bağlamda, yenilikçi giderim teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanması kaçınılmaz bir zorunluluk haline gelmiştir. İleri membran teknolojileri, yüksek giderim verimliliği sunmakla birlikte, membran tıkanması ve işletme maliyetleri gibi operasyonel zorlukları beraberinde getirmektedir. Nanomateryal bazlı teknolojiler, özellikle manyetik nanopartiküller, laboratuvar ölçeğinde umut verici sonuçlar göstermekte ancak çevresel güvenlik ve maliyet sorunları henüz tam olarak çözülememiştir. Enzim mühendisliği ve biyolojik degradasyon yaklaşımları, mikroplastikleri kaynağında yok etme potansiyeli taşıması açısından en sürdürülebilir çözüm olarak öne çıkmaktadır, ancak degradasyon hızlarının yavaş olması ve farklı polimer türleri için spesifik enzimlerin geliştirilmesi gerekliliği bu alanın önündeki temel engellerdir. İleri oksidasyon prosesleri ve elektrokimyasal yöntemler ise, özellikle endüstriyel atıksuların arıtımında ve diğer teknolojilerle entegre hibrit sistemlerde gelecek vaat etmektedir.

Sonuç olarak, mikroplastik kirliliğinin etkin bir şekilde kontrol altına alınabilmesi için çok yönlü bir yaklaşıma ihtiyaç vardır. Bu çerçevede, aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

***Teknolojik Gelişim ve Araştırma:*** Yenilikçi giderim teknolojilerinin pilot ve tam ölçekli uygulamalarının artırılması, bu teknolojilerin gerçek koşullarda performanslarının değerlendirilmesi ve optimizasyonu için kritik önem taşımaktadır. Özellikle Türkiye'de, farklı iklim koşulları ve atıksu karakteristiklerine sahip bölgelerde bu teknolojilerin test edilmesi, ulusal ölçekte uygulanabilirliğin belirlenmesi açısından değerlidir.

***Hibrit Sistem Yaklaşımı:*** Tek bir teknolojinin tüm mikroplastik türlerini ve boyutlarını etkili bir şekilde gidermesi mümkün olmadığından, farklı teknolojilerin avantajlarını birleştiren hibrit sistemlerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması gerekmektedir. Örneğin, konvansiyonel arıtma ile ileri membran filtrasyonunun veya elektrokoagülasyon ile biyolojik degradasyonun entegrasyonu, daha sağlam ve verimli çözümler sunabilir.

***Kaynak Kontrolü ve Önleme:*** Mikroplastik kirliliğinin kaynağında önlenmesi, en etkili ve sürdürülebilir yaklaşımdır. Sentetik tekstillerin yıkanması sırasında mikrofiber salımını azaltan filtrelerin yaygınlaştırılması, kişisel bakım ürünlerinde mikroboncuk kullanımının tamamen yasaklanması ve plastik ambalaj kullanımının azaltılması gibi önleyici tedbirler, atıksu arıtma tesislerine gelen mikroplastik yükünü önemli ölçüde azaltabilir.

***Mevzuat ve Standartlar:*** Türkiye'de ve dünyada, atıksu deşarj standartlarının mikroplastik konsantrasyonlarını da kapsayacak şekilde güncellenmesi gerekmektedir. Ayrıca, arıtma çamurunun tarımsal uygulamalarda kullanımına yönelik düzenlemelerin mikroplastik içeriği açısından gözden geçirilmesi, karasal ekosistemlerin korunması için elzemdir.

**Farkındalık ve Eğitim:** Mikroplastik kirliliğinin kaynaklarının ve etkilerinin toplumun tüm kesimleri tarafından anlaşılması, davranış değişikliği ve gönüllü önlemlerin alınması açısından önemlidir. Akademik kurumlar, sivil toplum kuruluşları ve kamu otoriteleri işbirliği içinde, bu konuda farkındalık artırıcı kampanyalar ve eğitim programları düzenlemelidir.

**Uluslararası İşbirliği:** Mikroplastik kirliliği sınır tanımayan küresel bir sorundur. Bu nedenle, bilimsel araştırmaların, teknolojik gelişmelerin ve en iyi uygulamaların uluslararası platformlarda paylaşılması, ortak çözümlerin geliştirilmesi ve uygulanması için kritik önem taşımaktadır.

Mikroplastik kirliliğiyle mücadele, disiplinler arası bir yaklaşım, sürekli araştırma ve geliştirme faaliyetleri, etkili politikalar ve toplumsal katılım gerektiren uzun soluklu bir süreçtir. Atıksu arıtma tesisleri, bu mücadelenin merkezinde yer almakta ve yenilikçi teknolojilerin entegrasyonu ile bu tesisler, mikroplastik kirliliğinin azaltılmasında kilit bir rol oynayabilir. Gelecekte, daha temiz bir çevre ve sağlıklı ekosistemler için, bu alandaki çabaların artırılması ve sürdürülmesi büyük önem taşımaktadır.

## KAYNAKÇA

- Akarsu, C. (2022). İleri atıksu arıtma metotlarının mikroplastik giderim veriminin incelenmesi. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, 7(2), 145-152.
- Akarsu, C., Kıdeyş, A. E., & Kumbur, H. (2017). Evsel atık su arıtma tesislerinin sucul ekosisteme mikroplastik tehdidi. *Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi*, 74(3), 249-256.
- Akdemir, T., & Çelik, M. (2023). Rize İli Atık Su Arıtma Tesislerinde Mikroplastik Kirliliğinin Araştırılması. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, 8(4), 567-574.
- Akkaya, G. K., & Üçgül, İ. (2023). Doğrudan Güneş Enerjisi Kullanılarak Tekstil Atıksularının Elektrokoagülasyon ile Arıtımı. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 13(1), 234-247.
- Al-Amri, A., Alataway, A., Rezk, R. A., Allam, A., Dewidar, A. Z., & Mattar, M. A. (2024). Microplastics removal efficiency and risk analysis of wastewater treatment plants. *Chemosphere*, 349, 140893.
- AlShamaileh, E., & Alzoubi, M. (2025). Microplastics removal efficiency in wastewater treatment plants in Jordan. *Science Progress*, 108(3), 00368504251376048.
- Atmaca, K., & Öztürk, E. (2022). İleri Oksidasyon Proseslerinin Sızıntı Sularının Arıtımında Kullanımı. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (34), 234-241.
- Blair, R. M., Waldron, S., Phoenix, V. R., & Gauchotte-Lindsay, C. (2019). Average daily flow of microplastics through a tertiary wastewater treatment plant over a ten-month period. *Water Research*, 163, 114909.
- Bozdaş, K., & Ateş, A. (2020). Atıksu arıtma tesislerinde mikro plastikler ve giderim yöntemleri. *Çevre Mühendisliği Dergisi*, 14(3), 189-198.
- Carr, S. A., Liu, J., & Tesoro, A. G. (2016). Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants. *Water Research*, 91, 174-182.
- Carr, S. A., Liu, J., & Tesoro, A. G. (2016). Transport and fate of microplastics in wastewater treatment plants. *Water Research*, 91, 174-182.
- Choi, J., Kim, H., Ahn, Y. R., Kim, M., Yu, S., Kim, N., ... & Lee, S. Y. (2024). Recent advances in microbial and enzymatic engineering for the biodegradation of micro-and nanoplastics. *RSC Advances*, 14(15), 10385-10428.
- Cristaldi, A., Fiore, M., Zuccarello, P., Oliveri Conti, G., & Ferrante, M. (2020). Efficiency of wastewater treatment plants (WWTPs) for microplastic removal: a systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(21), 8014.
- Crosset-Perrotin, G., Wiesner, M., Sander, M., Bucheli, T. D., Morgenroth, E., & Kaegi, R. (2025). Efficient removal of microplastic particles from wastewater through formation of heteroagglomerates during the activated sludge process. *Journal of Hazardous Materials*, 139875.
- Dawson, A. L., Kawaguchi, S., King, C. K., Townsend, K. A., King, R., Bengtson Nash, S. M., & Virtue, P. (2021). Turning up the heat on plastic pollution: the effect of temperature on polyester microfibre ingestion and fragmentation in Antarctic krill (*Euphausia superba*). *Marine Pollution Bulletin*, 166, 112219.
- Di Bella, G., Corsino, S. F., De Marines, L., Lopresti, F., La Carrubba, V., & Torregrossa, M. (2022). Occurrence of microplastics in waste sludge of wastewater treatment plants: Comparison between membrane bioreactor (MBR) and conventional activated sludge (CAS) technologies. *Membranes*, 12(4), 371.

- Gallo, M., Fossi, C., Weber, R., & Panti, C. (2018). Marine litter plastics and microplastics and their toxic chemicals components: the need for urgent preventive measures. *Environmental Sciences Europe*, 30(1), 13.
- Gençağ, B. S. (2025). Mikroplastik Kirliliği: Sağlık Riskleri ve Sürdürülebilir Çözüm Önerileri. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(1), 45-58.
- Gürel, L., & Büyükgüngör, H. (2011). Atıksu arıtımında membran biyoreaktörler. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 26(4), 65-82.
- Gürtekin, E. (2014). Bir ileri oksidasyon prosesi: Fenton prosesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(6), 216-224.
- Hu, Z., Wang, S., Yu, R., & Li, F. (2024). Microplastics in wastewater plants: A review of sources, occurrence, removal, and potential risks. *Science of The Total Environment*, 908, 168089.
- Indhur, R., P, S., & M, P. (2023). Nanomaterials for Microplastic Removal from Wastewater: Current State of the Art Nanomaterials and Future Prospects. *ACS ES&T Water*, 3(10), 2919–2938.
- Iyare, P. U., Ouki, S. K., & Bond, T. (2020). Microplastics removal in wastewater treatment plants: a critical review. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 6(10), 2664-2675.
- Kaushal, J., Khatri, M., & Arya, S. K. (2021). Recent insight into enzymatic degradation of plastics prevalent in the environment: A mini-review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4, 100138.
- Kayar, M. K., & Uncumusaoğlu, A. A. (2024). Giresun (Türkiye) Kıyılarında Mikroplastik Kirliliğinin Araştırılması. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*.
- Kılıç, M. Y., & Kestioğlu, K. (2008). Endüstriyel atıksuların arıtımında ileri oksidasyon prosesleri. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 18(4), 242-248.
- Kim, S., Lee, J., & Kim, J. (2022). Advanced oxidation processes for microplastics degradation: A recent trend. *Chemical Engineering Journal Advances*, 8, 100179.
- Kim, S., So, Y., Lee, S., & Lee, C. H. (2024). Ceramic membranes as a potential high-performance alternative to polymeric membranes for microplastic fiber removal from laundry wastewater. *Separation and Purification Technology*, 338, 126543.
- Köker, B. (2023). Mikroplastiklerin Atıksu Arıtma Tesislerindeki Etkileri ve Giderim Yöntemleri. *Uluslararası Çevre ve Bilim Araştırmaları Dergisi*, 2(2), 89-101.
- Kwon, H. J., Kim, H. M., Henkel, J., Todt, D., & Choi, H. (2022). Elimination of microplastics at different stages in wastewater treatment plants. *Water*, 14(15), 2404.
- Li, J., Liu, H., & Chen, J. P. (2018). Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection. *Water Research*, 137, 362-374.
- Liang, S., et al. (2025). Advanced microplastics remediation: From environmental formation to Fenton-based degradation—mechanisms, system optimization, and remaining challenges. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 120517.
- Lin, Z., et al. (2025). Membrane technology for microplastic removal: Microplastic occurrence, challenges, and innovations of process and materials. *Chemical Engineering Journal*, 166183.
- Long, Z., Pan, Z., Wang, W., Ren, J., Yu, X., Lin, L., ... Pan, X. (2021). Heterogeneity and contribution of microplastics from municipal wastewater to riverine environment: A case study of Qingdao City, China. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 770634.
- Martic, S., Kovacevic, I., & Tasic, Z. (2022). Emerging electrochemical tools for microplastics detection and removal. *Frontiers in Sensors*, 3, 958633.

- Martin, L. M. A., Sheng, J., Zimba, P. V., Zhu, L., & Fadare, O. O. (2022). Testing an Iron Oxide Nanoparticle-Based Method for Magnetic Separation of Nanoplastics and Microplastics from Water. *Nanomaterials*, 12(14), 2348.
- Miino, M. C., Gomes, A. R., Rech, S., Bergmann, M., & Korez, Š. (2024). Microplastics removal in wastewater treatment plants. *Science of The Total Environment*, 912, 169045.
- Murphy, F., Ewins, C., Carbonnier, F., & Quinn, B. (2016). Wastewater treatment works (WwTW) as a source of microplastics in the aquatic environment. *Environmental Science & Technology*, 50(11), 5800-5808.
- Özbay, İ., Kılıç, S., & Genç, N. (2016). Elektrokoagülasyon Prosesi İle Gıda Endüstrisi Atıksularının Arıtımı. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20(2), 214-221.
- Özkaleli, M., & Erdem, A. (2018). Nanoatıklar ve çevre: Atık yönetiminde yeni bir yaklaşım. *Çevre Bilim ve Teknoloji*, 1(1), 36-48.
- Partal, R., & Kılıç, B. (2021). Hastane Atıksularının Membran Biyoreaktör’de (MBR) Arıtımı. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (21), 550-557.
- Perren, W., Wojnarowska, A., & Whitehead, K. A. (2018). Removal of Microbeads from Wastewater Using Electrocoagulation. *ACS Omega*, 3(3), 3349–3355.
- Plastics Europe. (2023). *Plastics – the Facts 2023*. Brussels, Belgium: Plastics Europe.
- Ragusa, A., Svelato, A., Santacroce, C., Catalano, P., Notarstefano, V., Carnevali, O., ... & Giorgini, E. (2021). Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International*, 146, 106274.
- Rochman, C. M., Hoh, E., Hentschel, B. T., & Kaye, S. (2013). Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress. *Scientific Reports*, 3(1), 3263.
- Rodrigo, P. M., et al. (2025). Application of Hybrid Ceramic Membranes for Microplastic Removal from Wastewater. *Journal of Composites Science*, 4(4), 76.
- Sağsöz, Y. D., & Çelik, S. Ö. (2023). Mikrokirleticilerin Ekolojik Ayak izleri ve Arıtım Yöntemleri. *Çevre Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(2), 145-158.
- Salini, A., et al. (2024). Plastic-Degrading Microbial Consortia from a Wastewater Treatment Plant. *Microorganisms*, 12(5), 999.
- Senathirajah, K., Clarke, B. O., & Tat-Dat, B. (2023). Fate and transformation of microplastics due to electrocoagulation treatment. *Environmental Pollution*, 335, 122294.
- Sewwandi, M., Wijesekara, H., Rajapaksha, A. U., & Vithanage, M. (2024). Microplastics in urban stormwater sediments and runoff: A review on source, transport, and remediation perspectives. *Journal of Environmental Management*, 352, 120071.
- Song, M., et al. (2024). Removal of Microplastics in a Hybrid Treatment Process of Ceramic Microfiltration and Photocatalyst-Mounted Spheres. *Water*, 16(17), 2345.
- Soysal, M. (2024). Mikroplastik Tespitinde Güncel Stratejiler: Türkiye Örneği. *JENAS Journal of Environmental and Natural Studies*, 6(2), 234-247.
- Subair, A., et al. (2024). Evaluating the performance of electrocoagulation system in the removal of polystyrene microplastics from water. *Environmental Pollution*, 343, 123199.
- Tanyol, M., & Demir, V. (2017). Elektrokoagülasyon Prosesi Kullanılarak Mezbaa Atıksularının Arıtımı. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7(1), 175-183.
- Topkaya, E., et al. (2025). Removal of Microplastics By Ozone Oxidation from Urban Wastewater Treatment Plant Effluent. *Water, Air, & Soil Pollution*, 236(9), 606.
- Ünşar, E. K., Pehlivan, E., & Yıldız, S. (2016). Nanomateryal Uygulamalarının Çevre Mühendisliği Açısından Değerlendirilmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(5), 352-363.



- Velasco, A. N., et al. (2024). Impact of a nanofiltration system on microplastic contamination in reclaimed water. *Chemosphere*, 352, 141369.
- Wang, T., et al. (2024). Molecular engineering of PETase for efficient PET degradation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 265, 130832.
- Werbowski, L. M., Gilbreath, A. N., Munno, K., Zhu, X., Grbic, J., Wu, T., ... Sutton, R. (2021). Urban stormwater runoff: A major pathway for anthropogenic particles, black rubbery fragments, and other types of microplastics to urban receiving waters. *ACS ES&T Water*, 1(6), 1420-1428.
- Yakut, Ş. M. (2025). Türkiye'nin Ege ve Akdeniz Kıyılarında Bulunan Bazı Bölgelerdeki Mikroplastik (MP) Kirliliğinin Araştırılması. *İstanbul Commerce University Journal of Science*, 24(47), 398-413.
- Yılmaz, Z., & Karagözoğlu, M. B. (2019). Atıksuların Arıtılmasında Elektrokoagülasyon Uygulamaları. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(1), 157-167.
- Yurtsever, A., Sahinkaya, E., Aktaş, Ö., Uçar, D., Çınar, Ö., & Wang, Z. (2017). Tekstil Endüstrisi Atıksularının Dinamik ve Mikrofiltrasyon Membranlarla Arıtımı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(7), 850-857.
- Yüksel, E., Şengil, İ. A., & Özacar, M. (2009). Membran teknolojileri ile alternatif su temini: Desalinasyon ve atıksu geri kazanımı. *Çevre ve Deniz Bilimleri Dergisi*, 1(1), 1-16.
- Zilifli, A., & Tuncer, S. (2021). Dalyan-İztuzu (Doğu Akdeniz) sahilinde mikroplastik kirliliğinin araştırılması. *Çanakkale Onsekiz Mart University Journal of Marine Sciences and Fisheries*, 4(1), 1-13.
- Zurier, H. S., & Goddard, J. M. (2023). PETase Engineering for Enhanced Degradation of Microplastic Fibers in Simulated Wastewater Sludge Processing Conditions. *ACS ES&T Water*, 3(4), 1058–1068.



# Bölüm 2

## DENİZ DİBİ TARAMADA DİJİTALLEŞME: OTONOM SİSTEMLER VE VERİ TABANLI YÖNETİM<sup>1</sup>

*Erdal KAŞIKCI<sup>2</sup>, Meltem EKEN<sup>3</sup>*

1 Bu çalışma Prof.Dr. Meltem EKEN 'in danışmanlığında Erdal KAŞIKCI tarafından hazırlanmış ve İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tarafından kabul edilmiş olan "Deniz Dibi Taramada Dijitalleşme: Otonom Sistemler ve Veri Tabanlı Yönetim" adlı Yüksek Lisans Bitirme ödevinden üretilmiştir.

2 İskenderun Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Denizcilik İşletmeleri Yönetimi bölümü mezunu, ekasikci.lee24@iste.edu.tr <https://orcid.org/0009-0001-1157-5374>

3 Prof. Dr. İskenderun Teknik Üniversitesi, Barbaros Hayrettin Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Profesör, meltem.eken@iste.edu.tr <https://orcid.org/0000-0002-4831-2885>

## 1. GİRİŞ

### 1.1 Giriş ve Problem Tanımı

Küresel ölçekte artan ticaret hacmi ve deniz taşımacılığının stratejik önemi, liman altyapılarının sürekli gelişimini zorunlu hâle getirmiştir. Özellikle son yıllarda gemi boyutlarının büyümesi, konteyner hacimlerinin artması ve yeni lojistik güzergâhların oluşması, limanların fiziksel kapasitesinin yanı sıra teknolojik donanım açısından da gelişmesini gerekli kılmıştır. Deniz dibi taramaları, liman altyapısının işlevselliğini sürdürmek ve deniz trafiğinde emniyeti sağlamak amacıyla gerçekleştirilen vazgeçilmez mühendislik uygulamaları arasında yer almaktadır.

Ancak geleneksel yöntemlerle sürdürülen deniz dibi tarama faaliyetleri, zamanla birçok kısıt ve sorunla karşı karşıya kalmıştır. Bunlar arasında operasyonel yetersizlikler, düşük hassasiyet, yüksek maliyet, çevresel etkiler ve insan hatasına açık süreçler sayılabilir. Bu nedenle, günümüzde bu faaliyetlerin dijital dönüşüme tabi tutulması kaçınılmaz hâle gelmiştir. Teknolojinin dijitalleşme boyutu, deniz tabanı tarama süreçlerini daha verimli hâle getirirken, uzun vadeli yönetim stratejilerine ve çevresel hassasiyetlere de katkı sunmaktadır.

### 1.2 Deniz Dibi Taramanın Önemi

Deniz dibi tarama faaliyetleri, liman işletmeciliğinde gemi trafiğinin güvenliğini sağlamak, su derinliğini muhafaza etmek, yeni yapıların inşası öncesi zemin hazırlığı yapmak ve doğal afetler sonrası deniz tabanını düzenlemek gibi çok çeşitli amaçlara hizmet eder. Özellikle sediment birikiminin yoğun olduğu nehir ağzları ve kıyı bölgelerinde bu faaliyetler, ulaşım altyapısının işleyişi için hayati önem taşır.

Tarama çalışmaları sadece fiziksel altyapının korunmasıyla sınırlı değildir. Aynı zamanda, çevresel etki analizlerinin yapılmasına olanak sağlayan veri üretimi, batimetrik haritalama, deniz habitatlarının korunması ve stratejik liman planlaması açısından da önemli katkılar sağlar. Bu nedenle deniz dibi tarama faaliyetleri, sadece bir mühendislik uygulaması değil; aynı zamanda çevresel, ekonomik ve lojistik bir planlama aracıdır.

### 1.3 Dijitalleşmenin Genel Tanımı

Dijitalleşme; analog veri, süreç ve hizmetlerin dijital teknoloji yardımıyla daha erişilebilir, ölçülebilir ve yönetilebilir hâle getirilmesi sürecidir. Bu süreç sadece veri toplama değil, aynı zamanda bu verilerin anlamlandırılması, analiz edilmesi, depolanması ve karar verme mekanizmalarına entegre edilmesini kapsar. Sensör tabanlı izleme sistemleri, veri odaklı analiz teknikleri, nesnelerin interneti ve yapay zekâ uygulamaları, dijital dönüşümün kapsamını farklı mühendislik alanlarına yaygınlaştırmıştır.

Dijital teknolojilerdeki gelişmelerin sektörel düzeyde hızla benimsenmesi, denizcilik alanını dijitalleşmenin etkisinin yoğun biçimde hissedildiği sektörlerden biri konumuna getirmiştir. Liman operasyonlarının dijitalleştirilmesiyle birlikte tarama faaliyetleri de geleneksel manuel yöntemlerden uzaklaşarak, otomasyon ve veri odaklı sistemlerle yürütülmeye başlanmıştır. Dijital teknolojilerin kullanımı yalnızca günlük uygulamaları daha verimli hâle getirmekle kalmamakta, aynı zamanda geleceğe dönük kararların daha sağlıklı ve veri temelli biçimde alınmasına olanak tanımaktadır.

## 1.4 Denizcilik ve Liman Yönetiminde Dijitalleşme

Denizcilik sektörü, doğası gereği büyük hacimli verilerin üretildiği ve sürekli değişen çevresel koşullara bağlı olarak dinamik kararların alınması gereken bir alandır. Bu durum, liman yönetiminde dijital araçların kullanılmasını kaçınılmaz hâle getirmiştir. Günümüzde liman yönetim sistemleri (Port Management Information Systems - PMIS), coğrafi bilgi sistemleri (GIS), otomasyon yazılımları ve uzaktan izleme sistemleri gibi dijital altyapılar, limanların neredeyse tüm operasyonel süreçlerinde etkin olarak kullanılmaktadır.

Deniz dibi tarama faaliyetleri de bu dijital dönüşümün bir parçası olmuş; GNSS destekli konumlandırma, çok huzmeli sonar (multibeam sonar) ile derinlik haritalama, gerçek zamanlı veri aktarımı gibi uygulamalar, klasik yöntemlerin yerine geçmiştir. Böylece liman işletmeleri, tarama faaliyetlerinin etkinliğini artırmakta ve çevresel riskleri en aza indirme konusunda önemli avantajlar kazanmaktadır.

## 1.5 Otonom Sistemlerin Yükselişi

İleri düzeyde algoritmalar ve sensörler ile donatılmış otonom sistemler, dışarıdan sürekli bir kontrol ihtiyacı olmadan görev icra edebilmektedir. Söz konusu teknolojiler içinde en yaygın şekilde kullanılanlar arasında, AUV, ASV ve ROV sistemleri yer almaktadır. Bu sistemler, deniz dibi tarama faaliyetlerinde geleneksel yöntemlerle ulaşılamayan bölgelere erişim sağlar, riskli alanlarda insan gücü yerine kullanılabilir ve operasyonel maliyetleri önemli ölçüde düşürür.

AUV ve ASV sistemleri, özellikle batimetrik veri toplama, sediment analizi ve haritalama faaliyetlerinde yüksek doğruluk ve süreklilik sağlar. Gelişmiş sensörlerle donatılmış bu araçlar, büyük veri setleri üretebilir ve bu verileri anlık olarak merkezlere iletebilir. Ayrıca bu sistemler yapay zekâ destekli algoritmalarla donatıldığında, engelleri tanıma, rota planlama ve veri analizi gibi yeteneklere de kavuşur. Operasyonların daha sistematik ve kontrol edilebilir hale gelmesi, güvenlik standartlarının yükseltilmesini mümkün kılmaktadır.

## 1.6 Veri Tabanlı Yönetimin Gerekliği

Veriye dayalı yönetim altyapıları, bilgi birikiminin organize edilerek değerlendirilmesini ve karar süreçlerine entegre edilmesini sağlar. Bu amaçla geliştirilen veri tabanlı yönetim sistemleri, liman operasyonlarına ilişkin tüm bilgilerin merkezi olarak izlenmesini ve raporlanmasını mümkün kılar. Özellikle PostgreSQL gibi açık kaynak veri tabanı altyapıları, PostGIS uzantısıyla birlikte mekânsal verilerin etkin yönetimini sağlar.

Bu sistemler sayesinde tarama ekipmanlarından elde edilen konumsal ve batimetrik veriler, standart veri formatlarında saklanabilir ve geçmişe dönük analizlerde kullanılabilir. Aynı zamanda bu veriler, görselleştirme araçları ile birleştirilerek üç boyutlu modelleme yapılmasına da olanak tanır. Böylece karar vericiler, operasyonel planlamayı daha bilimsel temellere dayandırabilir ve çevresel etkileri minimize edecek stratejiler geliştirebilir.

## 1.7 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Çalışmanın temel amacı, deniz dibi tarama uygulamalarında dijitalleşmenin teknik altyapısı, çevresel etkileri ve yönetsel süreçler üzerindeki yansımalarını incelemek; otonom teknolojilerin kullanım alanlarını değerlendirmek ve veri odaklı yönetim sistemlerinin bu dönüşümdeki katkılarını analiz etmektir. Çalışma kapsamında, klasik yöntemlerin karşılaştığı zorluklar, modern teknolojilerin sunduğu çözümler, liman derinleştirme stratejileri, çevresel etkiler ve yasal düzenlemeler gibi çok boyutlu konular incelenmiştir.

Ayrıca Türkiye'deki örnek uygulamalar üzerinden mevcut durum analiz edilerek, geleceğe yönelik iyileştirme önerileri sunulmuştur. Çalışma hem sektörel uygulayıcılara hem de akademik araştırmacılara yol gösterecek bir çerçeve sunmayı amaçlamaktadır.

## 1.8 Yöntem ve Yaklaşım

Çalışma, nitel araştırma yöntemine dayanmakta olup, öncelikle literatür taraması yoluyla bilgi toplanmıştır. Ulusal ve uluslararası bilimsel makaleler, sektör raporları, teknik kılavuzlar ve resmi belgeler incelenmiş; ayrıca Türkiye'de uygulanan projelerden elde edilen veriler ışığında çözümlenmeler yapılmıştır. Metodolojik olarak betimsel analiz ve karşılaştırmalı değerlendirme teknikleri kullanılmış; bilgi ve veriler APA 6 yazım kurallarına göre düzenlenmiştir.

## 1.9 Bölüm Yapısı

Bu çalışmanın ikinci bölümünde, deniz dibi tarama teknikleri geleneksel ve modern yöntemler kapsamında ele alınmakta; üçüncü bölümde dijitalleşmenin sektöre etkisi ve otonom sistemler incelenmektedir. Dördüncü bölüm, veri tabanlı yönetim sistemlerine ve büyük veri analitiğine odaklanırken; beşinci bölümde görselleştirme araçları ve karar destek sistemleri değerlendirilmektedir. Altıncı ve yedinci bölümler sırasıyla ekonomik/çevresel etkiler ve yasal düzenlemeleri kapsamaktadır. Sekizinci bölümde ise sektörel ve teknolojik gelecek öngörülerini sunulmakta; son bölümde genel sonuçlar ve öneriler yer almaktadır.

## 2. DENİZ DİBİ TARAMA TEKNİKLERİ VE LİMAN DERİNLEŞTİRME

### 2.1 Deniz Dibi Tarama Kavramı ve Tarihçesi

Deniz dibi tarama, su altı tabanında biriken tortuların, çökeltilerin ve atık materyallerin çeşitli tekniklerle çıkarılması işlemidir. Bu faaliyet, tarihsel olarak denizcilik altyapısının korunması ve iyileştirilmesi amacıyla uygulanmıştır. Antik liman şehirlerinden günümüz uluslararası konteyner limanlarına kadar uzanan süreçte, tarama teknikleri gerek mühendislik gerekse teknolojik açıdan sürekli gelişim göstermiştir.

Başlangıçta sadece insan gücüne dayalı yöntemlerle yapılan tarama faaliyetleri, Sanayi Devrimi'nden sonra mekanik kazı makinelerinin kullanılmasıyla daha sistematik hâle gelmiştir. 20. yüzyılın ikinci yarısında tarama makinelerinde hidrolik sistemlerin devreye girmesiyle hem hız hem de alan kapsamı büyük ölçüde artmıştır. Günümüzde ise bu faaliyetler, otonom sistemler, sonar destekli haritalama teknolojileri ve veri odaklı yönetim sistemleriyle bütünleşmiştir.

## 2.2 Tarama Faaliyetlerinin Sınıflandırılması

Deniz dibi tarama işlemleri, gerçekleştirildikleri amaç ve alanlara bağlı olarak üç temel kategori altında sınıflandırılmaktadır.

1. **Bakım Taraması:** Liman, rıhtım, kanal ve demirleme alanlarında zamanla biriken sedimentin temizlenmesi amacıyla yapılır. Bu, en sık uygulanan tarama türüdür.
2. **Yeni İnşaat Taraması:** Yeni liman yapıları, köprü temelleri, deniz altı tünelleri veya enerji altyapısı (kablo, boru hatları) inşası öncesinde uygulanır.
3. **Çevresel Amaçlı Tarama:** Kirleticilerin veya ekolojik tehdit oluşturan maddelerin uzaklaştırılması amacıyla yapılır. Bu tür taramalar ÇED kapsamında sıkı şekilde denetlenmektedir.

Sınıflandırma hem kullanılan ekipmanı hem de süreç yönetimini doğrudan etkilediği için uygulama öncesi doğru analiz gerektirir.

## 2.3 Geleneksel Tarama Teknikleri

### 2.3.1 Mekanik Tarama Sistemleri

Mekanik tarama yöntemleri, kepçe, kazıcı veya ekskavatör gibi araçlarla deniz tabanının doğrudan kazılmasını içerir. Bu yöntemler genellikle kıyıya yakın, sığ sularda uygulanır. En yaygın ekipman türleri arasında **kova (clamshell) tarayıcılar**, **ekskavatör dubalar** ve **vinçli kepçeler** yer alır. Bu sistemler düşük yatırım maliyeti ve kullanım kolaylığı nedeniyle tercih edilse de, çalışma süresi uzun ve hassasiyet oranı düşüktür.

### 2.3.2 Hidrolik Tarama Sistemleri

Bu sistemlerde suyla karıştırılan sedimentler yüksek güçlü pompalar yardımıyla emilerek boru hatları aracılığıyla uzaklaştırılır. **Cutter Suction Dredger (CSD)** ve **Trailing Suction Hopper Dredger (TSHD)** sistemleri bu kategoriye girer. CSD'ler sabit çalışır ve yüksek yoğunluklu malzeme (örneğin kil, kaya) kazısında etkilidir. TSHD'ler ise hareket hâlinde tarama yaparak yumuşak sedimentleri büyük hacimlerde taşıyabilir. Bu sistemler çok daha derin ve geniş alanlar için uygun olmaktadır.

Her iki sistem de sediment türüne, akıntıya ve derinliğe göre farklı performanslar gösterir. Mekanik sistemler genellikle dar olan yerlerde; hidrolik sistemler ise geniş yüzeylerde tercih edilmektedir.

## 2.4 Modern Tarama Teknolojileri

Günümüzde klasik yöntemler, teknolojik gelişmelerle desteklenmekte veya yerini tam dijital sistemlere bırakmaktadır. Deniz yüzeyinin ayrıntılı ve üç boyutlu biçimde modellenmesini sağlayan Multibeam ve Side Scan Sonar uygulamaları, tarama sürecinin hem planlama hem de doğrulama aşamalarında teknik doğruluğu artırmaktadır.

Tarama operasyonlarında kullanılan GPS destekli sistemler, GNSS teknolojisiyle birlikte çalışarak ekipmanların konumsal hassasiyetini üst düzeye taşımaktadır. Aynı zamanda **Coğrafi Bilgi**

**Sistemleri (GIS)** kullanılarak veriler mekânsal analizler için uygun formatta saklanır ve işlenir. Bu teknolojiler, zamandan ve kaynaktan tasarruf sağlar.

Tarama işlemleri artık sadece fiziksel değil, aynı zamanda “veri operasyonu” hâline gelmiştir. Her bir tarama işlemi sonucunda toplanan veri; haritalama, analiz ve raporlama süreçlerinde kullanılmak üzere veri tabanlarında işlenmektedir.

## 2.5 Liman Derinleştirme Faaliyetleri

Liman derinleştirme işlemleri, artan gemi boyutları ve draft derinlikleri nedeniyle küresel olarak daha da önemli hâle gelmiştir. Son yıllarda artan gemi boyutlarıyla birlikte, özellikle Post-Panamax ve ULCS sınıfı konteyner gemilerinin liman operasyonlarında güvenli manevra yapabilmesi adına, rıhtım ve geçiş kanallarının derinliklerinin 15–20 metre seviyesine ulaştırılması gerekli hâle gelmiştir.

Bu bağlamda yürütülen derinleştirme faaliyetleri, çoğunlukla büyük ölçekli kamu yatırımları ve özel sektör iş birlikleriyle gerçekleştirilir. Derinleştirme sırasında kullanılan CSD ve TSHD tipi gemiler, operasyon hacmine göre değişkenlik gösterir. Ayrıca tarama sonucunda çıkarılan sedimentin yeniden kullanımı (örneğin kıyı dolgu projelerinde) çevresel sürdürülebilirlik açısından önem kazanmıştır.

Derinleştirme faaliyetlerinin başarısı, deniz tabanı zemin analizlerinin doğruluğuna, tarama alanı haritalarının kalitesine ve sürecin iyi yönetilmesine bağlıdır.

## 2.6 Türkiye’de Uygulama Örnekleri

Deniz ulaştırma bakımından çok önemli bir bölgeye sahip olan Türkiye, sahip olduğu uzun kıyı şeridi ve yoğun liman trafiği doğrultusunda deniz dibi tarama faaliyetlerinde önemli ölçüde tecrübe ve deneyim konusuna sahiptir. Özellikle Ambarlı, Mersin, Aliağa, İskenderun ve Tekirdağ limanları gibi büyük ticaret merkezlerinde düzenli bakım ve derinleştirme çalışmaları yapılmaktadır. Bu çalışmaların büyük bir kısmı Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı koordinasyonunda yürütülmekte; liman işletmeleri ve özel tarama firmaları işin operasyonel kısmını üstlenmektedir.

Ambarlı Limanı’nda 2021 yılında yürütülen bir derinleştirme projesi kapsamında, 2,5 milyon metreküp sediment taranmış ve liman kapasitesi %30 artırılmıştır. Aliağa bölgesinde ise doğal gaz terminallerine yanaşan LNG tankerlerinin draft ihtiyaçlarını karşılamak üzere liman derinliği 18 metreye çıkarılmıştır.

Bu projeler sadece ticaret kapasitesine değil; aynı zamanda iş gücü, altyapı ve çevresel planlama açısından da önemli çıktılar sunmuştur.

## 2.7 Değerlendirme

Deniz dibi tarama tekniklerinin tarihsel gelişimi ve teknolojik dönüşümü, günümüz limanlarının daha güvenli, verimli ve çevreye duyarlı biçimde yönetilmesini mümkün kılmaktadır. Geleneksel yöntemler hâlâ bazı bölgelerde kullanılmakla birlikte, modern sistemlerin sunduğu veri hassasiyeti, otomasyon kolaylığı ve sürdürülebilirlik avantajları giderek ön plana çıkmaktadır.



Türkiye özelinde değerlendirildiğinde, kamu ve özel sektör iş birliği ile yürütülen projelerin daha fazla dijitalleşme ve yapay zekâ tabanlı karar destek sistemleriyle desteklenmesi kaçınılmazdır. Tarama ve derinleştirme faaliyetlerinin gelecek başarısı, bu teknolojilerin etkin şekilde entegre edilmesine bağlı olacaktır.

### 3. DİJİTALLEŞME VE OTONOM SİSTEMLER

#### 3.1 Dijitalleşmenin Temel Kavramları

Dijitalleşme, analog verilerin dijital forma dönüştürülmesinin ötesinde; süreçlerin, sistemlerin ve karar mekanizmalarının dijital teknoloji ile yeniden yapılandırılması anlamına gelir. Bu kavram, yalnızca veri ile ilgili değil, aynı zamanda organizasyon yapılarının, operasyon modellerinin ve iş süreçlerinin dijital araçlarla entegrasyonunu da kapsar. Bilgi ve iletişim teknolojilerindeki hızlı gelişim, sektörler arası rekabeti dijital yeterlilik eksenine taşımış ve denizcilik gibi geleneksel sektörlerde dahi köklü dönüşümleri tetiklemiştir.

Dijitalleşme ile birlikte sistemler arasında gerçek zamanlı veri alışverişi mümkün hâle gelmiş, otomatik karar verme mekanizmaları, izleme sistemleri ve performans ölçüm platformları yaygınlaşmıştır. Bu dönüşüm sadece teknolojik değil, aynı zamanda yönetsel ve stratejik boyutlar da taşır. Günümüzde dijitalleşme; büyük veri analitiği, nesnelerin interneti (IoT), bulut bilişim, siber güvenlik ve yapay zekâ gibi çok bileşenli teknolojik bir mimariyi içerir.

#### 3.2 Denizcilik Sektöründe Dijitalleşme Dinamikleri

Doğası gereği çok sayıda değişkeni içeren ve büyük ölçekte yatırım gerektiren denizcilik sektörü, aynı zamanda yüksek düzeyde risk barındıran bir faaliyet alanıdır. Bu nedenle karar verme süreçlerinin hızlandırılması, veri akışının güvenli ve kesintisiz olması ve operasyonların gerçek zamanlı izlenebilmesi büyük önem taşır. Bu ihtiyaçlar doğrultusunda liman işletmeleri, armatör firmalar ve kıyı tesisleri dijital teknolojilere yönelmiştir. Özellikle otomatik tanımlama sistemleri (AIS), uzaktan izleme platformları ve dijital haritalama araçları, operasyonel süreçlerin temel bileşeni hâline gelmiştir.

Dijitalleşme sayesinde lojistik süreçlerin koordinasyonu daha şeffaf hâle gelmiş; gemi varış, yükleme-boşaltma, rıhtım kullanımı gibi temel liman operasyonlarında zaman ve maliyet tasarrufu sağlanmıştır. Ayrıca bu sistemler, olası gecikmeleri önceden tahmin etme, hava koşullarına bağlı riskleri analiz etme ve bakım planlaması yapma gibi ileri düzey işlevler de sunmaktadır.

#### 3.3 Otonom Sistemler: Kavramlar ve Tanımlar

Karmaşık görevleri insan yönlendirmesi olmadan yerine getirebilecek şekilde tasarlanan otonom sistemler; veri toplama, analiz etme ve karar üretme süreçlerini kendi iç mekanizmalarıyla yönetebilen teknolojik çözümler olarak tanımlanabilir. Denizcilik bağlamında otonom sistemler; hem yüzeyde hem de su altında görev yapabilen araçlar aracılığıyla veri toplama, ölçüm yapma, tarama ve analiz gerçekleştirme kapasitesine sahiptir. Bu sistemler, önceden tanımlanmış algoritmalar doğrultusunda çevresel koşulları analiz eder, uygun kararlar alır ve rotasını ya da görevini optimize edebilir. Bu sistemler arttıkça insan müdahalesi azalmaktadır.

Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO), otonom sistem deniz araçlarını dört farklı kategoriye ayırmaktadır:

- **Seviye 1:** İnsanlı kontrol altında otomasyon destekli sistemler
- **Seviye 2:** Sınırlı bağımsızlıkla çalışan robotik sistemler
- **Seviye 3:** Tam otonom ancak uzaktan izleme imkânı olan sistemler
- **Seviye 4:** Bağımsız, kendi kararlarını kendi veren sistemler

Deniz dibi taramada kullanılan otonom sistemler, genellikle Seviye 2 ve Seviye 3 sınıfına giren araçlardan oluşur. Bu sistemler sayesinde insanlar için tehlikeli olan bölgelerde güvenli tarama yapılabilir ve aynı anda çok daha geniş alanlar daha kısa sürede analiz edilebilir.

### 3.4 AUV, ASV ve ROV Teknolojilerinin Yapısı ve İşlevi

#### 3.4.1 Autonomous Underwater Vehicle (AUV)

Otonom su altı araçları (AUV), insan müdahalesi olmadan önceden tanımlanmış görevleri gerçekleştirebilen robotik denizaltılardır. Bu araçlar, özellikle batimetrik veri toplama, su kalitesi ölçümü, sediment analizi ve denizaltı haritalama gibi işlemler için geliştirilmiştir. AUV'ler genelde çok detaylı ya da huzmeli sonar, su altı kamerası, LIDAR, CTD sensörleri gibi ekipmanlarla donatılır. İleri düzey modellerde yapay zekâ algoritmaları entegre edilerek çevresel değişkenlere göre karar verme kabiliyeti kazandırılmıştır.

AUV'lerin en büyük avantajı, ulaşılması zor, derin veya tehlikeli bölgelerde uzun süreli görev yapabilmeleridir. Ayrıca enerji verimliliği açısından da avantajlıdırlar. Kıyı istasyonlarından veri aktarımı yapabilen bu sistemler, tarama sonuçlarını anlık ya da görev tamamlandığında kullanıcıya sunar. Bu sayede klasik yöntemlerle günler sürecektir işlemler saatler içerisinde tamamlanabilir.

#### 3.4.2 Autonomous Surface Vehicle (ASV)

Otonom yüzey araçları (ASV), deniz yüzeyinde seyir hâlindeyken sensörleri aracılığıyla veri toplayabilen sistemlerdir. Genellikle AUV'lerin destekleyicisi olarak görev yaparlar. ASV'ler üzerinde GNSS, radar, sonar, hava durumu sensörleri gibi çeşitli ekipmanlar bulunur. Özellikle liman, nehir ve kıyı bölgelerinde yaygın olarak kullanılan ASV'ler, enerji ihtiyaçlarını güneş panelleri veya hibrit motor sistemleriyle karşılayabilir.

ASV'ler sayesinde gemi trafiğinin yoğun olduğu bölgelerde çarpışma riski olmadan tarama yapılabilmekte ve bu sayede liman trafiği aksatılmadan sürdürülebilir bir tarama planlaması yürütülebilmektedir. Özellikle dar manevra alanlarının dijital haritalandırılmasında ASV sistemleri büyük avantaj sağlar.

#### 3.4.3 Remotely Operated Vehicle (ROV)

ROV'ler, insan kontrolünde çalışan fakat doğrudan fiziksel müdahale yapabilen robotik sistemlerdir. Su altındaki kaynakların tamiri, batık su yüzeyine çıkarma, boru hattı denetimi gibi görevlerde kullanılırlar. Tarama faaliyetlerinde ise çoğunlukla gözlem ve kontrol amacıyla destekleyici sistem

olarak görev yaparlar. ROV'ler, kablo bağlantısı sayesinde sürekli veri aktarımı sağlayabilir ve manipülatör kollarla mekanik görevleri gerçekleştirebilir.

ROV'lerin sunduğu görüntüleme kalitesi ve müdahale imkânı, özellikle yüksek hassasiyetli projelerde ve özel durumlarda (örneğin tehlikeli atık tespiti) tercih edilmesini sağlar.

### 3.5 Yapay Zekâ, Sensör Sistemleri ve Veri Toplama

Otonom sistemlerin başarısı daha çok sahip oldukları sensör detaylarına ve bu sensörlerden gelen verilerin işleme şekillerine bağlıdır. Multibeam olan sonarlar, LIDAR sistemleri, sıcaklık, tuzluluk ve çözülmüş oksijen ölçüm cihazları, manyetometreler ve akustik modüller gibi sensörler bu sistemlerin temel bileşenleridir.

Yapay zekâ entegrasyonu sayesinde, bu sensörlerden gelen veriler otomatik olarak sınıflandırılabilir, istisnai durumlar tanımlanabilir ve optimum rotalar belirlenebilir. Örneğin; bir AUV sisteminin deniz tabanındaki eğim değişimini analiz ederek çarpışma riski olan bölgeden kaçınması tamamen bu yapay zekâ destekli karar sistemleriyle mümkündür.

Bu teknolojiler sayesinde tarama verileri daha az hata içerir, manuel düzeltme ihtiyacı azalır ve sahadan ofise veri akışı hızlanır. Özellikle liman yönetimleri için bu veriler, planlama, bakım ve yatırım kararlarında kritik rol oynamaktadır.

### 3.6 Uygulama Alanları ve Operasyonel Avantajlar

Otonom sistemlerin kullanım alanı yalnızca deniz dibi taramayla sınırlı değildir. Bu sistemler aynı zamanda:

- Deniz tabanı modelleme
- Batık ve moloz tespiti
- Boru hattı ve kablo güzergâhı kontrolü
- Denizcilik eğitimi ve araştırmaları
- Tsunami, deprem ve kıyı erozyonuna ilişkin izleme çalışmaları gibi pek çok alanda etkin olarak kullanılmaktadır.

Operasyonel açıdan bakıldığında, otonom sistemlerin en önemli avantajları şunlardır:

- **Kesintisiz çalışabilme:** İnsana bağlı olmadan uzun süreli görevler yapılabilir.
- **Yüksek hassasiyet:** GNSS, sonar ve diğer sensörlerle elde edilen veriler hata payı düşük ve tekrarlanabilir düzeydedir.
- **Çevresel sürdürülebilirlik:** Klasik yöntemlere göre daha az fiziksel müdahale içerdiğinden çevre dostudur.
- **Maliyet etkinliği:** Uzun vadede insan gücü ve enerji tüketimi açısından daha ekonomiktir.
- **Veri odaklılık:** Gerçek zamanlı veri toplama ve analiz yeteneği, karar alma süreçlerini hızlandırır.

Bu sistemlerin kullanımını özellikle büyük liman projelerinde ve uluslararası araştırmalarda standart hâline gelmiş olup, gelecekte daha da yaygınlaşması beklenmektedir.

### 3.7 Uluslararası ve Türkiye’den Uygulama Örnekleri

Dünyada otonom sistemlerin deniz dibi tarama faaliyetlerinde kullanımı son yıllarda büyük bir ivme kazanmıştır. Özellikle gelişmiş denizcilik altyapısına sahip ülkeler, bu teknolojileri rutin liman bakım taramaları ve bilimsel araştırmalarda standart olarak kullanmaktadır. Örneğin, **Norveç**’te faaliyet gösteren **Kongsberg Maritime** firması, yüksek çözünürlüklü çok huzmeli sonar sistemleri ile donatılmış AUV’leri kullanarak fiyort derinliklerinin detaylı haritalandırılmasını sağlamaktadır.

**Avustralya** ve **İngiltere**, özellikle liman güvenliği ve çevresel izleme açısından otonom sistemlerin kullanımını yasal mevzuatla teşvik eden ülkeler arasında yer almaktadır. Bu ülkelerde yürütülen projelerde ASV’ler, liman giriş derinliğini sürekli ölçen, kendi rotasını güncelleyebilen sistemlerle entegre çalışmaktadır.

Türkiye’de ise bu alandaki uygulamalar henüz sınırlı olsa da gelişim göstermektedir. Özellikle **TÜBİTAK destekli projeler**, **MTA**, **Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı** ve bazı üniversiteler tarafından yürütülen araştırma faaliyetlerinde AUV sistemlerinin deneme amaçlı kullanımı görülmektedir. 2021 yılında Karadeniz kıyılarında yürütülen bir proje kapsamında, kıyı erozyonunun etkileri AUV’ler aracılığıyla ölçülmüş ve kıyı şeridi modellenmesi yapılmıştır. Ayrıca bazı özel liman işletmeleri, bakım taramaları için ASV tabanlı veri toplama sistemlerini test etmeye başlamıştır.

### 3.8 Dijitalleşmenin Zorlukları ve Sınırlamaları

Dijitalleşme ve otonom sistemlerin sağladığı avantajlar kadar bazı zorlukları da beraberinde getirdiği unutulmamalıdır. Bunların başında **yüksek ilk yatırım maliyetleri** gelir. Gelişmiş sensör sistemleri, AUV/ASV platformları ve yazılım lisansları önemli bütçeler gerektirir. Bu durum, özellikle gelişmekte olan ülkelerde teknolojinin yaygınlaşmasını yavaşlatmaktadır.

Bir diğer önemli sınırlama ise **insan kaynağı eksikliği**dir. Otonom sistemlerin etkin şekilde kullanılabilmesi için multidisipliner bilgiye sahip teknik personel gereklidir. Hem mühendislik hem de yazılım altyapısı gerektiren bu sistemler, eğitilmiş iş gücü eksikliği nedeniyle bazı durumlarda verimli kullanılamamaktadır.

Ayrıca **veri güvenliği**, **altyapı uyumsuzluğu**, **standardizasyon eksikliği** ve **mevzuat yetersizlikleri** de başlıca engeller arasında yer almaktadır. Örneğin, Türkiye’de henüz liman yönetmeliklerinde otonom sistemlerin kullanımı açıkça tanımlanmamıştır. Bu durum, kamu projelerinde bu teknolojilerin resmî olarak kullanılmasının önünü tıkayabilmektedir.

Son olarak, çevresel hassasiyet de bir diğer önemli sınırlayıcı faktördür. AUV veya ASV’lerin çalıştığı alanlarda deniz canlılarının etkilenmesi riski, bazı bölgelerde kullanımı kısıtlamaktadır. Bu nedenle cihazların çevre dostu olması ve çevresel etki analizlerinin yapılması büyük önem taşımaktadır.

### 3.9 Bölüm Değerlendirmesi

Deniz dibi tarama faaliyetlerinin dijitalleşmesi, sektörel verimliliği artırmakta ve operasyonel riskleri azaltmaktadır. Özellikle AUV, ASV ve ROV sistemleri sayesinde daha güvenli, hassas ve sürdürülebilir tarama faaliyetleri mümkün hâle gelmiştir. Yapay zekâ ve sensör teknolojilerinin

entegrasyonu, bu sistemlerin karar alma kabiliyetini artırmakta ve insan müdahalesini asgari seviyeye indirmektedir.

Dünyada birçok ülke, otonom deniz sistemlerinin liman altyapılarına entegrasyonunu hızla gerçekleştirirken; Türkiye’de bu alandaki gelişim yavaş fakat umut vericidir. Yerli üretim kapasitesinin artırılması, teknik personel yetiştirilmesi ve yasal düzenlemelerin yapılması bu süreci hızlandıracaktır.

Gelecekte denizcilik faaliyetlerinin büyük bölümü dijital sistemlerle planlanacak ve yürütülecektir. Bu dönüşüm, yalnızca mühendislik açısından değil; aynı zamanda çevresel, ekonomik ve yönetsel açılardan da büyük fırsatlar sunmaktadır. Ancak bu fırsatların değerlendirilmesi, stratejik planlama ve yatırımlarla mümkün olacaktır.

## 4. VERİ TABANLI YÖNETİM SİSTEMLERİ VE BÜYÜK VERİ ANALİTİĞİ

### 4.1 Veri Toplama ve Dijitalleşme Bağlantısı

Dijitalleşme sürecinin temelinde, verilerin güvenli, hızlı ve anlamlı şekilde toplanabilmesi ve analiz edilmesi yer almaktadır. Deniz dibi tarama faaliyetlerinde geleneksel yöntemler, veri toplama sürecini çoğunlukla manuel ölçüm ve gözleme dayandırırken; dijital sistemler, sensörler aracılığıyla elde edilen verileri otomatik olarak kaydedebilmekte ve analiz edilebilecek formatlara dönüştürebilmektedir. Bu durum, yalnızca operasyonel verimliliği artırmakla kalmaz, aynı zamanda karar süreçlerini de objektif ve bilimsel verilere dayandırır.

Tarama faaliyetlerinde toplanan veriler genellikle batimetrik ölçümler, sediment özellikleri, konum verileri, cihaz konfigürasyonları ve çevresel parametreler gibi çoklu veri kaynaklarından oluşur. Bu verilerin tutarlı bir yapıda saklanabilmesi için güçlü bir veri tabanı altyapısına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca verinin gerçek zamanlı olarak işlenebilmesi, uzaktan erişim sağlanabilmesi ve uzun vadede arşivlenebilmesi, veri yönetiminin vazgeçilmez bir parçasıdır. Bu bağlamda veri tabanlı sistemler, dijitalleşmenin sürdürülebilirliğini sağlayan temel bileşenlerden biridir.

### 4.2 Veri Tabanı Yönetim Sistemleri (VTYS)

Veri Tabanı Yönetim Sistemleri (VTYS), çok miktarda verinin düzenli, güvenli ve erişilebilir şekilde saklanmasını ve işlenmesini sağlayan sistemlerdir. Tarama projelerinde kullanılan veriler; konumsal (spatial), zamansal (temporal) ve sayısal (numerik) özellikler taşıdığından, bu sistemlerin yüksek performanslı ve ölçeklenebilir olması gereklidir. Bu sistemler sayesinde büyük miktarda veri merkezi bir yapıda toplanabilir, sorgulanabilir ve raporlanabilir hâle gelir.

En yaygın kullanılan açık kaynaklı VTYS örneklerinden biri **PostgreSQL**’dir. Bu sistem, özellikle mekânsal veri yönetimi için geliştirilmiş **PostGIS** uzantısıyla, deniz dibi tarama verilerinin analizinde oldukça etkilidir. Ayrıca **Oracle Spatial**, **Microsoft SQL Server Spatial** ve **MySQL** gibi ticari çözümler de mekânsal veri barındırma ve yönetme yetenekleri sunmaktadır. Bu sistemler aracılığıyla, tarama yapılan alanların üç boyutlu modellenmesi yapılabilir; zaman içinde oluşan değişiklikler izlenebilir ve kritik bölgelerde müdahale kararları alınabilir.

Veritabanları ayrıca kullanıcı yetkilendirme, veri yedekleme ve sistem güvenliği gibi konularda da avantaj sağlar. Liman işletmeleri, kamu kurumları ve mühendislik firmaları, bu sistemleri kullanarak operasyonel süreçlerini daha şeffaf ve kontrol edilebilir bir yapıya kavuşturabilir.

### 4.3 Mekânsal Veritabanları (PostGIS, Oracle Spatial vb.)

Mekânsal veritabanları, coğrafi bilgilerin ve konumsal verilerin saklanmasına, işlenmesine ve analiz edilmesine olanak tanır. Bu sistemler, sadece tablo şeklinde veriyi depolamakla kalmaz; aynı zamanda bu veriler arasında konumsal ilişkileri tanımlar ve analiz eder. Örneğin, deniz dibi tarama sırasında elde edilen batimetrik veriler, PostGIS altyapısıyla birlikte kullanıldığında, sahanın üç boyutlu topografyasının çıkarılmasına olanak sağlar.

**PostGIS**, açık kaynak kodlu bir eklenti olarak, PostgreSQL veritabanı sistemini coğrafi bilgi sistemi özelliği kazandırır. Bu sistem aracılığıyla poligonlar, çizgiler, noktalar ve raster veriler kolayca depolanabilir ve analiz edilebilir. Örneğin, bir limanın yıllar içindeki tarama verilerine göre sediment birikimi oranları çıkarılabilir; bu veriler görselleştirilerek planlama sürecine katkı sunabilir. PostGIS, ayrıca web tabanlı haritalama çözümleriyle de entegre edilebilir ve dinamik veri sunumu yapılabilir.

**Oracle Spatial** ve **SQL Server Spatial** gibi ticari çözümler, özellikle büyük ölçekli liman işletmelerinde tercih edilir. Bu sistemler, yüksek performanslı işlem kapasiteleri, GUI destekli kullanıcı arayüzleri ve entegrasyon kolaylığı ile dikkat çeker. Ayrıca yapay zekâ destekli analiz araçları ile veri madenciliği süreçlerine de olanak tanır. Mekânsal veritabanları sayesinde karar vericiler, sadece mevcut durumu değil, aynı zamanda gelecekteki potansiyel riskleri de tahmin edebilirler.

### 4.4 Büyük Veri (Big Data) Kavramı

Büyük veri, geleneksel veri işleme yöntemleriyle analiz edilmesi mümkün olmayan, hacim, hız ve çeşitlilik bakımından yüksek boyutlara ulaşmış veri setlerini ifade eder. Deniz dibi tarama operasyonları, çok sayıda sensörden gelen anlık veriler, yüksek çözünürlüklü sonar çıktıları, coğrafi konum verileri ve zaman serileri gibi unsurlar içerdiğinden, büyük veri kapsamına girmektedir. Bu verilerin etkin bir şekilde yönetilebilmesi, analiz edilebilmesi ve karar sistemlerine entegre edilebilmesi için özel yöntem ve yazılımların kullanılması gerekmektedir.

Büyük veri, genellikle “3V” modeliyle tanımlanır: **Volume (Hacim)**, **Velocity (Hız)** ve **Variety (Çeşitlilik)**. Tarama faaliyetleri sırasında elde edilen veriler bu üç özelliği birden taşıdığı için klasik veri tabanı sistemleri yerine, Hadoop, Spark, NoSQL gibi dağıtık sistem mimarilerinin kullanılması gerekebilir. Örneğin, bir limanda yapılan yıllık tarama faaliyetleri sonucunda elde edilen veri seti terabaytlarca hacme ulaşabilir; bu veriler, analiz için paralel işlem sistemlerine aktarılabilir.

Büyük verinin önemi, yalnızca veri miktarıyla değil, bu verilerden çıkarılacak anlamlı sonuçlarla ölçülmektedir. Bu nedenle veri madenciliği, makine öğrenmesi ve görselleştirme araçlarının büyük veriyle entegre edilmesi hayati önem taşımaktadır.

#### 4.5 Analitik Süreçler ve Yöntemler

Büyük veri ortamlarında analiz, sadece veri okuma değil; aynı zamanda bu verilerden anlamlı bilgi çıkarma, geleceğe yönelik tahmin yapma ve operasyonel süreçleri iyileştirme işlevlerini kapsar. Bu bağlamda analitik süreçler; tanımlayıcı analiz (descriptive analytics), kestirimsel analiz (predictive analytics) ve yönlendirici analiz (prescriptive analytics) olmak üzere üç temel başlığa ayrılır. Deniz dibi tarama faaliyetlerinde bu analiz türlerinin her biri farklı aşamalarda kullanılabilir.

**Tanımlayıcı analiz**, geçmiş verilere dayanarak mevcut durumun anlaşılmasını sağlar. Örneğin, bir limanda son beş yılda yapılan tarama çalışmalarının sediment birikimi dağılımı, harita tabanlı grafiklerle sunulabilir. **Kestirimsel analiz**, makine öğrenmesi modelleri kullanılarak gelecekteki durumlara dair tahminler sunar. Bu sayede belirli bölgelerde ne zaman yeni tarama ihtiyacı doğabileceği önceden hesaplanabilir. **Yönlendirici analiz** ise, eldeki kaynaklar ve operasyonel kısıtlar doğrultusunda en uygun müdahale yöntemini belirlemeyi amaçlar. Bu analiz türü, karar destek sistemlerinin temelini oluşturur.

Bu süreçlerde **Python**, **R**, **MATLAB** gibi veri bilimi yazılımları ile **ArcGIS**, **QGIS**, **Tableau** gibi görselleştirme araçları birlikte kullanılmaktadır. Ayrıca **makine öğrenmesi**, **derin öğrenme**, **sınıflandırma**, **kümeleme** gibi teknikler, özellikle büyük ölçekli projelerde veri analizi için yaygın olarak tercih edilmektedir.

#### 4.6 Gerçek Zamanlı Karar Destek Sistemleri

Gerçek zamanlı karar destek sistemleri (RT-DSS), saha koşullarından gelen verileri anlık olarak işleyerek yöneticilere stratejik karar alma imkânı sunan platformlardır. Bu sistemler, liman işletmeleri ve tarama şirketleri açısından zaman, maliyet ve risk yönetimi konusunda önemli avantajlar sağlar. Özellikle dijital sensörlerden elde edilen anlık derinlik, akıntı, sıcaklık ve sediment verileri bu sistemlere entegre edilerek, operasyonel senaryoların dinamik olarak planlanması sağlanabilir.

Bir RT-DSS sistemi, üç temel bileşenden oluşur: veri toplama modülü (sensörler ve veri sağlayıcılar), analiz motoru (yapay zekâ ve istatistiksel modelleme) ve karar sunum arayüzü (dashboard ya da kontrol paneli). Bu bileşenler birbiriyle entegre çalışarak, liman içi tarama planlamaları, ekipman rotaları, çakışma senaryoları ve çevresel etkiler gibi çoklu değişkenleri eş zamanlı analiz edebilir.

Örneğin, güçlü bir RT-DSS ile bir tarama gemisinin ne zaman hangi rıhtım bölgesine geçmesi gerektiği otomatik olarak belirlenebilir. Bu sistemler ayrıca acil durumlara (örneğin fırtına, su altı heyelanı) karşı erken uyarı verebilir ve müdahale süreçlerini hızlandırabilir. Gerçek zamanlı sistemlerin gelişmesi, geleneksel "tepkisel" yaklaşımı yerini "proaktif" yönetime bırakmaktadır.

#### 4.7 Uygulama Örnekleri ve Türkiye'deki Durum

Dünya genelinde liman işletmeleri ve kıyı mühendisliği projelerinde veri tabanlı yönetim sistemleri standart uygulama hâline gelmiştir. **Singapur Limanı**, gerçek zamanlı veri toplama ve analiz sistemleriyle tüm liman sahasını dijital ikiz olarak modelleyerek, bakım ve tarama planlarını dinamik biçimde yürütmektedir. **Hollanda Rotterdam Limanı**, PostGIS altyapısıyla entegre çalışan büyük veri sistemleri sayesinde sediment dinamiklerini yıllık periyotlarla öngörebilmektedir.

**ABD’de NOAA**, çok yıllık tarama verilerini mekânsal veri tabanlarında toplayarak kıyı değişimlerini analiz etmekte, karar vericilere görsel destekli veri sunumları hazırlamaktadır. Bu sistemler ayrıca çevre koruma politikalarının oluşturulmasında da kullanılmaktadır. **Norveç**, AUV sistemleriyle entegre çalışan analitik platformlar sayesinde deniz dibi taramalarını veri odaklı şekilde yönetmektedir.

Türkiye’de ise veri tabanlı yönetim sistemlerinin kullanım düzeyi henüz istenilen seviyede değildir. Ancak son yıllarda bazı büyük liman işletmeleri (örneğin Mersin, Aliğa) kendi bünyelerinde GIS tabanlı veri izleme sistemleri kurmuşlardır. **TÜBİTAK, MTA, Karadeniz Teknik Üniversitesi ve İTÜ** gibi kurumlar ise açık kaynak veritabanları ve analiz araçlarıyla çeşitli bilimsel projeler yürütmektedir. Yasal düzenlemelerin yetersizliği, standart eksikliği ve teknik personel açığı, Türkiye’de bu sistemlerin yaygın kullanımını kısıtlayan başlıca etkenlerdir. Ancak bu eksikliklere rağmen, dijital dönüşüm konusunda farkındalık giderek artmakta ve birçok kurum pilot uygulamalarla sistemi test etmektedir.

#### 4.8 Değerlendirme

Veri tabanlı yönetim sistemleri ve büyük veri analitiği, deniz dibi tarama operasyonlarının hem teknik hem de yönetsel boyutlarında devrim niteliğinde katkılar sağlamaktadır. Özellikle büyük hacimli verilerin gerçek zamanlı analiz edilmesi, operasyonların daha planlı, güvenli ve çevreye duyarlı yürütülmesini mümkün kılmaktadır. Mekânsal veritabanları ve yapay zekâ destekli sistemler, bu sürecin temel yapı taşlarıdır. Dijital sistemlerin karar alma süreçlerine entegrasyonu, liman işletmeciliği açısından sadece teknik bir gelişme değil, aynı zamanda rekabet üstünlüğü sağlayan stratejik bir adımdır. Türkiye’nin bu süreçte teknolojik kapasitesini artırması, yerli yazılım çözümleri üretmesi ve insan kaynağını bu alanda yetiştirmesi büyük önem arz etmektedir.

Özetle, deniz dibi tarama faaliyetlerinin başarıyla yürütülebilmesi için sadece tarama ekipmanları değil, bu ekipmanlardan elde edilen verilerin işlenmesi ve anlamlandırılması süreci de eş zamanlı olarak gelişmelidir. Veri tabanlı yönetim sistemleri bu bütünsel yaklaşımın merkezinde yer almakta; geleceğin dijital liman yapısının temelini oluşturmaktadır.

### 5. GÖRSELLEŞTİRME VE KARAR DESTEK SİSTEMLERİ

#### 5.1 Veri Görselleştirmenin Önemi

Dijitalleşme sürecinde elde edilen büyük veri yığınları, ancak doğru analiz ve etkili görselleştirme ile anlamlı hâle getirilebilir. Veri görselleştirme; karmaşık ve çok boyutlu veri kümelerinin grafik, harita, diyagram veya etkileşimli arayüzler ile sadeleştirilmesini sağlayarak, karar vericilerin veriye dayalı ve doğru analizler yapabilmesini mümkün kılar. Bu özellik, deniz dibi tarama faaliyetleri gibi teknik alanlarda karar alma süreçlerinin bilimsel zemine oturtulması açısından son derece kritiktir.

Tarama verilerinin, özellikle batimetrik ölçümlerin, sediment dağılımlarının ve zaman serisi değişimlerinin görsel formatlarda sunulması; operasyonel planlamaların ve çevresel etki analizlerinin daha sağlıklı yapılmasını sağlar. Görselleştirme sayesinde farklı meslek gruplarının (mühendis, çevreci, yöneticiler) aynı veriye ortak bir anlayışla yaklaşması mümkün olur. Bu da multidisipliner projelerde iletişimi ve etki analizini güçlendirir.



## 5.2 2B ve 3B Haritalama Teknikleri

Tarama faaliyetleri sonucunda elde edilen veriler, çoğunlukla X, Y, Z (enlem, boylam, derinlik) koordinatlarını içerir. Bu veriler, iki boyutlu (2B) veya üç boyutlu (3B) haritalara dönüştürülerek analiz edilebilir. 2B haritalar, genel alan taramaları ve sınırlı sediment dağılımı için uygundur. Ancak 3B haritalama teknikleri, deniz tabanı morfolojisinin detaylı incelenmesi, hacim hesaplamaları, çökme ve yükselme analizleri gibi çok daha gelişmiş uygulamalara olanak tanır.

**Multibeam sonar** ve **LIDAR sistemleri** ile toplanan veriler, GIS platformlarında işlenerek 3B yüzey modelleri oluşturulabilir. Bu modellerde farklı derinlik seviyeleri renklendirilerek tarama alanlarının hangi bölgelerinde kritik derinlik sorunu yaşandığı kolaylıkla analiz edilebilir. Ayrıca bu modeller zaman serileriyle birlikte kullanıldığında, sediment birikiminin yönü ve miktarı hakkında öngörülebilir.

Açık kaynak sistemlerden **QGIS**, **CloudCompare**, **Blender** gibi araçlar bu tür modellemelerde sıklıkla kullanılırken; büyük ölçekli projelerde **ArcGIS Pro**, **AutoDesk Civil3D**, **Fledermaus** gibi profesyonel yazılımlar tercih edilmektedir.

## 5.3 Dijital İkiz (Digital Twin) Teknolojisi

Dijital ikiz kavramı, fiziksel bir sistemin sanal bir modelinin oluşturulması ve bu modelin gerçek zamanlı verilerle sürekli güncellenmesi esasına dayanır. Denizcilik ve liman yönetiminde dijital ikiz kullanımı, özellikle altyapı projelerinde risk analizi, bakım planlaması ve optimizasyon çalışmaları açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

Deniz dibi tarama operasyonlarında dijital ikiz teknolojisi kullanıldığında; liman derinlik durumu, sediment hareketleri, rıhtım çevresi topoğrafyası ve çevresel parametreler (akıntı, tuzluluk, sıcaklık) sürekli olarak sanal modele yansıtılabilir. Bu sayede herhangi bir müdahale yapılmadan önce çeşitli senaryolar test edilebilir, olası sonuçlar önceden analiz edilebilir. Bu teknoloji aynı zamanda yapay zekâ sistemleriyle entegre edildiğinde, kendi kendini güncelleyen ve öngörülebilir uyarılar veren akıllı sistemler ortaya çıkar.

Örneğin, bir limanda yıllık tarama hacmi sabitlenmişse, dijital ikiz bu hacmin en etkin şekilde hangi bölgelerde uygulanması gerektiğini öneren analizler sunabilir. Bu, maliyetleri düşürürken verimliliği de artırır.

## 5.4 Karar Destek Sistemlerinin Mantığı ve Bileşenleri

Karar Destek Sistemleri (KDS), yapılandırılmış ya da yapılandırılmamış problemler karşısında karar vericilere bilgi desteği sağlayan, veri ve model tabanlı sistemlerdir. Deniz dibi tarama faaliyetleri gibi değişkenlerin çok olduğu, çevresel ve teknik boyutların iç içe geçtiği süreçlerde bu sistemler hayati öneme sahiptir. KDS'ler sayesinde hangi alanda, ne zaman ve nasıl tarama yapılacağı gibi kritik kararlar, bilimsel temellere dayandırılabilir.

Tipik bir karar destek sistemi; veri tabanı (mevcut ve geçmiş veriler), modelleme modülü (simülasyon, optimizasyon, kestirim) ve kullanıcı arayüzünden oluşur. Kullanıcı, bu sistem üzerinden

farklı senaryoları test edebilir, sonuçları analiz edebilir ve risk değerlendirmesi yapabilir. Özellikle GIS tabanlı KDS'ler, coğrafi alanlara göre dinamik analizler yapılmasını mümkün kılar.

Modern KDS'ler bulut tabanlı yapılarla entegre edilmekte, mobil cihazlardan erişim sağlanmakta ve görselleştirme bileşenleriyle desteklenmektedir. Bu sayede, sahadaki veriye ofisten erişim mümkün olurken, mobil ekipler de sistem içinden karar süreçlerine dâhil olabilir. Bu yapı, operasyonun esnekliğini ve doğruluğunu büyük ölçüde artırır.

### 5.5 Liman Yönetiminde Kullanım Alanları

Liman yönetimi, çok sayıda dinamik değişkenin (hava koşulları, gemi trafiği, yükleme-boşaltma süreleri, su derinliği, çevresel faktörler) eş zamanlı takibini gerektiren karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu nedenle karar vericilerin doğru ve zamanında bilgiye ulaşabilmesi, operasyonel etkinlik açısından belirleyicidir. Görselleştirme ve karar destek sistemleri bu ihtiyacı karşılamak üzere liman operasyonlarının pek çok alanında kullanılmaktadır.

Örneğin, rıhtım derinliğinin düzenli kontrolü için kullanılan 3B haritalama sistemleri, liman yönetim yazılımlarına entegre edilerek liman içi gemi yönlendirme süreçlerini optimize etmektedir. Ayrıca yaklaşım kanallarında sediment birikimi analiz edilerek tarama ihtiyacının zamanı ve alanı önceden belirlenebilir. Bunun yanı sıra yükleme-boşaltma planlaması, demirleme alanı tahsisi ve çevre izleme gibi alanlarda da görselleştirme tabanlı sistemler etkin rol oynar.

Büyük limanlarda kullanılan "dijital ikiz" sistemleri sayesinde limanın sanal ortamda güncel bir modellemesi oluşturulmakta ve bu model, gerçek zamanlı sensör verileri ile sürekli güncellenmektedir. Böylece fiziksel müdahale yapılmadan farklı senaryolar test edilebilmekte ve stratejik kararlar daha güvenli biçimde alınabilmektedir.

### 5.6 Uygulama Örnekleri

**Rotterdam Limanı (Hollanda)**, karar destek sistemleriyle entegre çalışan en gelişmiş dijital liman modellerinden birine sahiptir. Liman yönetimi, tarama işlemleri de dâhil olmak üzere tüm faaliyetleri görselleştirilmiş arayüzler üzerinden planlamakta ve veri tabanlı kararlar almaktadır. Örneğin, batimetrik haritalar üzerinden derinlik analizleri yapılmakta, tarama planları otomatik olarak belirlenmektedir. Ayrıca yapay zekâ destekli sistemler ile sediment hareketi öngörülmesi sağlanmakta ve buna göre müdahale zamanlaması planlanmaktadır.

**Singapur Limanı**, GIS tabanlı karar destek sistemlerini liman işletmeciliğinin tüm süreçlerine entegre etmiştir. Gemi yönlendirme, kıyı altyapı bakımı ve çevresel izleme gibi alanlarda görselleştirme temelli sistemler kullanılarak hata oranları önemli ölçüde düşürülmüştür. Limandaki tüm tarama operasyonları önceden simülasyon ile test edilmekte, oluşabilecek sapmalar önceden hesaplanmaktadır.

**Türkiye**'de ise Mersin Uluslararası Limanı, İstanbul Ambarlı Limanı ve Aliğa Nemrut Körfezi'ndeki limanlarda sınırlı düzeyde görselleştirme tabanlı sistemlerin kullanıldığı bilinmektedir. Bazı özel firmalar ve üniversiteler iş birliği ile pilot projeler başlatılmış ve dijital haritalama, karar destek yazılımları ve uzaktan veri erişimi gibi uygulamalar test edilmiştir. Ancak henüz bu sistemlerin yaygın ve entegre kullanımı sınırlıdır.

## 5.7 Zorluklar ve Değerlendirme

Her ne kadar görselleştirme ve karar destek sistemleri liman yönetimi ve deniz dibi tarama faaliyetlerine önemli katkılar sunsa da, bu teknolojilerin yaygın kullanımı bazı zorluklarla karşı karşıyadır. Öncelikle, bu sistemlerin kurulumu ve bakımı yüksek maliyetli olabilir. Özellikle küçük ve orta ölçekli liman işletmeleri için bu durum caydırıcı bir unsur oluşturmaktadır.

Bir diğer önemli zorluk, verinin kalitesidir. Görselleştirme sistemleri, doğru ve güncel veri ile beslendiğinde etkin çalışır. Ancak sensör hataları, veri eksiklikleri ya da yazılım uyumsuzlukları, yanlış analiz ve kararların alınmasına yol açabilir. Bu nedenle sistemlerin kurulumu kadar sürdürülebilir veri yönetimi de önem taşır.

Ayrıca, bu sistemleri yönetecek teknik personelin eğitimi ve sistemlerin mevcut altyapılarla entegre edilmesi de süreç içerisinde karşılaşılan diğer teknik zorluklardır. Türkiye'de bu alanda hem insan kaynağı hem de mevzuat düzeyinde gelişime ihtiyaç duyulmaktadır.

Sonuç olarak, görselleştirme ve karar destek sistemleri, dijitalleşen denizcilik sektörünün vazgeçilmez unsurları hâline gelmiştir. Bu sistemlerin etkin kullanımı, hem teknik performansı artırmakta hem de çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır. Türkiye'nin bu alanda daha rekabetçi bir pozisyona ulaşması için stratejik yatırımlar, ulusal politikalar ve üniversite-sanayi iş birlikleri büyük önem arz etmektedir.

## 6. EKONOMİK VE ÇEVRESEL DEĞERLENDİRME

### 6.1 Tarama Faaliyetlerinde Maliyet Bileşenleri

Deniz dibi tarama faaliyetleri, mühendislik açıdan karmaşık ve finansal açıdan yüksek maliyetli operasyonlardır. Bir tarama projesinin toplam maliyeti; ekipman, iş gücü, yakıt, bakım, taşıma, veri analiz altyapısı, çevresel değerlendirme ve bertaraf süreçleri gibi birçok kalemden oluşmaktadır. Bu maliyetler, projenin büyüklüğüne, kullanılan teknolojilere ve coğrafi konumuna göre önemli farklılıklar gösterir.

Geleneksel yöntemlerde ekipman ve iş gücü maliyetleri daha düşük olabilirken, zaman kaybı ve tekrar tarama gerekliliği gibi unsurlar dolaylı maliyetleri artırmaktadır. Öte yandan modern otonom sistemler ve dijital altyapılar ilk yatırım maliyeti yüksek olmasına rağmen, uzun vadede operasyonel verimliliği artırarak maliyetleri dengelemektedir. Ayrıca bu sistemler, veri doğruluğunun yüksek olması sayesinde yeniden müdahale gerekliliğini azaltmakta ve proje süresini kısaltmaktadır.

Tarama projelerinde bütçenin büyük bölümü genellikle **yakıt, kaptanlık ve personel ücretleri, makine amortismanı** ve **sediment bertarafı** gibi kalemlere ayrılmaktadır. Özellikle Türkiye gibi ithalata dayalı enerji kullanan ülkelerde yakıt maliyeti, toplam giderin %25'ini geçebilmektedir. Bu nedenle enerji verimliliği yüksek sistemlere geçiş ekonomik sürdürülebilirlik açısından kritik önemdedir.

## 6.2 Dijitalleşmenin Ekonomik Etkileri

Dijitalleşme, tarama faaliyetlerine doğrudan ve dolaylı ekonomik katkılar sağlamaktadır. En temel düzeyde dijitalleşme, operasyon süresinin kısaltılması, kaynak kullanımının optimize edilmesi ve hata payının azaltılması yoluyla maliyet etkinliğini artırmaktadır. Örneğin, klasik sistemlerle yapılan bir tarama 30 gün sürebilirken, dijital ölçüm ve otonom araç desteği ile bu süre 10–15 güne düşürülebilmektedir. Bu durum, gemi gecikmelerini önleyerek liman işletmeleri açısından büyük kazanç anlamına gelmektedir.

Ayrıca dijital sistemlerle toplanan verilerin arşivlenebilir ve tekrar analiz edilebilir olması, uzun vadeli planlamalarda stratejik fayda sağlar. Özellikle liman işletmeleri, geçmiş tarama verilerini kullanarak yatırım kararlarını daha bilimsel temellere dayandırabilir. Yıllık bakım periyotları optimize edilebilir ve bu da bakım maliyetlerinde %10–20 arasında tasarruf sağlayabilir.

Dijitalleşme aynı zamanda **yerli teknoloji üretimi, insan kaynağı geliştirme** ve **ihracat potansiyeli** gibi dolaylı ekonomik faydalar da yaratır. Türkiye’de geliştirilen yerli AUV, ASV ve veri analiz yazılımlarının dış pazarlara açılması, sektörel ekonominin büyümesine katkıda bulunacaktır. Böylece hem kamu yatırımları hem de özel sektör projeleri daha düşük maliyetle ve daha yüksek kaliteyle yürütülebilecektir.

## 6.3 Çevresel Etkiler ve Riskler

Deniz dibi tarama faaliyetleri, doğrudan deniz ekosistemi ile etkileşim hâlinde olduğu için çevresel açıdan hassas müdahaleler olarak kabul edilir. Tarama işlemleri sırasında deniz tabanından koparılan sedimentin çevreye yayılması, ekosistem üzerinde olumsuz etkiler yaratma potansiyeli taşır. Bu durum, sudaki bulanıklık seviyesini artırır ve ışık geçirgenliğini azaltarak özellikle fotosentez yapan organizmalar üzerinde olumsuz etki yaratır.

Sedimentlerin yer değiştirmesi, aynı zamanda tabanda yaşayan bentik organizmaların yaşam alanlarını kaybetmesine yol açabilir. Tarama ekipmanlarından kaynaklanan su altı gürültüsü ise özellikle memeli deniz canlılarında yön bulma sistemlerini bozarak davranış değişikliklerine neden olabilir. Tarama sırasında kirleticilerin (ağır metaller, petrol türevleri vb.) suya karışma riski de mevcuttur. Bu durum sadece deniz canlıları için değil, insanlar için de gıda zinciri üzerinden dolaylı risk oluşturur.

Ayrıca kıyı erozyonu, akıntı yapılarının bozulması ve habitat parçalanması gibi uzun vadeli etkiler de tarama projelerinin çevresel bilançosuna dâhildir. Bu risklerin minimize edilmesi için detaylı çevresel etki değerlendirme (ÇED) raporları, sürekli izleme sistemleri ve çevre dostu ekipmanların kullanımı şarttır.

## 6.4 Çevre Dostu Teknolojiler ve Sürdürülebilirlik Uygulamaları

Son yıllarda deniz dibi tarama faaliyetlerinde çevresel etkilerin azaltılmasına yönelik teknolojik gelişmeler ön plana çıkmıştır. Bu doğrultuda geliştirilen **çevre dostu tarama teknolojileri**, sediment yayılımını azaltan ekipmanlar, sessiz çalışan motor sistemleri, gerçek zamanlı çevre izleme sensörleri ve hassas pozisyonlama sistemlerinden oluşmaktadır. Bu teknolojiler hem operasyonel verimliliği artırmakta hem de çevresel etkiyi en aza indirmektedir.

Örneğin, **eco-dredging** olarak adlandırılan düşük emisyonlu ve düşük türbülanslı tarama sistemleri, sedimentin kontrollü şekilde kaldırılmasını sağlayarak suyun bulanıklığını en düşük düzeyde tutar. Bu sistemlerde genellikle özel tasarlanmış pompalar ve difüzör başlıkları kullanılır. Ayrıca bu sistemler, sedimenti yüzeye çıkarmadan önce filtreleyerek potansiyel kirleticilerin yayılmasını engelleyen teknolojilerle donatılmaktadır.

**Elektrikli veya hibrit motorlu tarama gemileri**, yakıt tüketimini azaltarak karbon salınımını düşürmektedir. Bunun yanı sıra, **biyobozunur hidrolik yağlar**, deniz ortamına olası sızıntıların zararını minimize eder. Gelişmiş GPS ve AIS sistemleri ile tarama güzergâhı hassas biçimde planlanarak minimum müdahale ile maksimum etki elde edilir. Ayrıca **canlı habitatların etrafında tampon bölgeler** oluşturarak doğal yaşamın korunması da sürdürülebilirlik politikalarının önemli bir parçasıdır.

Bu yaklaşımlar, özellikle Avrupa Birliği ülkelerinde liman altyapı projelerinde zorunlu hâle gelmiş; Türkiye'de ise bazı kamu ihalelerinde puanlama kriteri olarak uygulanmaya başlanmıştır.

## 6.5 Türkiye ve Dünyadan Değerlendirme Örnekleri

### Türkiye'den Örnek:

İzmir Aliağa Nemrut Körfezi'nde gerçekleştirilen geniş kapsamlı tarama projesinde, sedimentlerin türü, yayılım potansiyeli ve çevresel etkileri dikkate alınarak 3B modelleme ve çevresel simülasyon yazılımları ile proje planlaması yapılmıştır. Bu projede kullanılan TSHD tipi tarak gemisi, düşük türbülans başlıkla donatılmış ve sediment dağılımı %35 oranında azaltılmıştır. Aynı zamanda çıkarılan sediment, kıyı dolgu projelerinde kullanılarak döngüsel ekonomi ilkelerine katkı sağlanmıştır.

### Uluslararası Örnek:

**Belçika'nın Zeebrugge Limanı**'nda yürütülen ekolojik tarama projesinde, AUV sistemleri ile deniz tabanı sürekli izlenmiş ve hassas bölgelerde otomatik tarama sınırlandırması yapılmıştır. Çevre dostu motor sistemleri ile yıllık karbon salınımı %40 oranında azaltılmış; tarama esnasında etkilenen bentik canlı türleri koruma altına alınmıştır.

**Singapur**, çevresel etkiyi azaltmak için gerçek zamanlı su kalitesi sensörleri ve mobil laboratuvar sistemleriyle tarama operasyonlarını entegre etmiştir. Bu uygulamalar sayesinde projeler sırasında çevresel eşiklerin aşılması durumunda sistem otomatik olarak uyarı vermekte ve operasyon geçici olarak durdurulmaktadır.

Bu örnekler, hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirliğin dijitalleşme ile birlikte yönetilebileceğini göstermekte; karar vericilere önemli bir çerçeve sunmaktadır.

## 6.6 SWOT Analizi ve Genel Değerlendirme

Deniz dibi taramada dijitalleşme süreci, ekonomik ve çevresel açılardan önemli fırsatlar sunmakla birlikte bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Aşağıda bu sürecin SWOT (Güçlü Yönler, Zayıf Yönler, Fırsatlar, Tehditler) analizi yer almaktadır:

### **Güçlü Yönler**

Yüksek veri doğruluğu  
Operasyonel verimlilik artışı  
Çevresel etkiyi azaltma imkânı  
Gerçek zamanlı karar desteği

### **Fırsatlar**

Yerli teknoloji geliştirme  
Uluslararası proje ortaklıkları  
Üniversite-sanayi iş birliği  
Yeşil liman sertifikasyonları

### **Zayıf Yönler**

Yüksek ilk yatırım maliyeti  
Teknik personel eksikliği  
Mevzuat yetersizliği  
Veri güvenliği riskleri

### **Tehditler**

Çevresel denetim eksiklikleri  
Siber saldırı ve veri kaybı riski  
Kültürel değişime direnç  
Finansal kaynakların kısıtlılığı

Bu değerlendirmeye göre, Türkiye'nin güçlü altyapı yatırımları ve jeostratejik avantajı dijital tarama teknolojilerinde rekabetçi bir pozisyon almasını sağlayabilir. Ancak bu potansiyelin gerçekleştirilebilmesi için teknik kapasite geliştirme, mevzuat uyumu ve eğitim politikalarının hayata geçirilmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak, dijitalleşme ve çevre dostu yaklaşımlar bir arada uygulandığında, deniz dibi tarama faaliyetleri daha sürdürülebilir, verimli ve sorumlu bir yapıya kavuşacaktır. Bu da sadece bugünkü operasyonel ihtiyaçları değil, gelecekteki kuşaklara bırakılacak sağlıklı bir deniz çevresini de güvence altına alacaktır.

## **7. YASAL DÜZENLEMELER VE ULUSAL DURUM**

### **7.1 Uluslararası Mevzuat Çerçevesi**

Deniz dibi tarama faaliyetleri uluslararası deniz hukukunun bir parçası olarak; çevresel koruma, deniz trafiği güvenliği ve sürdürülebilir kaynak yönetimi ilkeleri çerçevesinde düzenlenmektedir. Bu alandaki en temel düzenleyici kurum, **Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO)**'dur. IMO, özellikle **MARPOL 73/78** (Denizlerin Gemiler Tarafından Kirlenmesinin Önlenmesine İlişkin Uluslararası Sözleşme) kapsamında, tarama faaliyetlerinden kaynaklanan atıkların denize deşarjını kısıtlayan kurallar koymuştur.

IMO'nun yanı sıra, **Londra Sözleşmesi (1972)** ve onun tamamlayıcısı olan **Londra Protokolü (1996)** de tarama çamurlarının denize boşaltılması konusunda küresel ilkeleri belirlemektedir. Bu belgelerde yer alan "ön izin", "atık sınıflandırması", "alıcı ortam değerlendirmesi" gibi hükümler, tarama faaliyetlerinin çevreye olan etkilerini minimize etmek üzere oluşturulmuştur. Avrupa Birliği (AB) mevzuatı ise çok daha kapsamlıdır. Özellikle **Deniz Stratejisi Çerçeve Direktifi (MSFD)** ve **Su Çerçeve Direktifi (WFD)**, kıyı alanlarında yürütülen faaliyetlerin çevreyle uyumlu şekilde yapılmasını zorunlu kılar. Bu çerçevede, tarama faaliyetlerinin başlamasından önce ayrıntılı **Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED)** raporlarının hazırlanması ve halk katılımı süreçlerinin işletilmesi gereklidir. Bu uluslararası mevzuatın ortak noktası, deniz dibi tarama işlemlerinin çevresel sürdürülebilirlik ilkelerine uygun biçimde yürütülmesini ve tarama faaliyetlerinden doğacak etkilerin sürekli izlenmesini zorunlu kılmasıdır.

## 7.2 Türkiye’de Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler

Türkiye’de deniz dibi tarama faaliyetleri doğrudan düzenleyen tek bir yasa bulunmamakla birlikte, çeşitli kanun, yönetmelik ve genelgeler üzerinden dolaylı olarak kontrol edilmektedir. Tarama çalışmaları, başta **Kıyı Kanunu (3621 Sayılı Kanun)**, **Çevre Kanunu (2872)** ve **İmar Kanunu (3194)** olmak üzere bir dizi düzenlemeye tabidir.

**Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) Yönetmeliği**, Türkiye’de tarama projelerinin çevresel boyutunu denetleyen en önemli yasal dayanaklardan biridir. Bu yönetmelik uyarınca, belirli bir hacmi aşan tarama projeleri için ÇED raporu hazırlanması zorunludur. ÇED süreci kapsamında ekolojik risk analizleri, su kalitesi değerlendirmeleri ve sediman örneklemeleri gibi teknik çalışmalar gerçekleştirilir.

Ayrıca **Limanlar Yönetmeliği**, tarama faaliyetlerini yürüten liman işletmelerine yönelik izin prosedürlerini tanımlar. Tarama çalışmaları öncesinde liman işletmecilerinin **Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı (UAB)**’ndan ve **Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı**’ndan onay alması gerekmektedir. Bu süreçte **Deniz Haritaları Genel Müdürlüğü**, **MTA**, **DSİ**, **Kıyı Emniyeti Genel Müdürlüğü** ve yerel belediyeler de sürece dâhil olabilir.

Ek olarak, tarama faaliyetlerinde çıkarılan malzemenin kıyıya dökülmesi veya başka bölgelerde kullanılması durumunda, **Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği** ve **Deniz Çevresinin Korunması Yönetmeliği** gibi düzenlemeler devreye girer.

## 7.3 Kurumsal Yapı ve Yetki Dağılımı

Deniz dibi tarama faaliyetlerinde Türkiye’de farklı düzeylerde birçok kamu kurumu görev yapmaktadır. Ancak bu kurumlar arasında yetki çakışmaları ve koordinasyon eksiklikleri zaman zaman projelerde gecikmelere ve uygulama sorunlarına yol açmaktadır.

- **Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı (UAB)**: Liman ve kıyı yapıları ile ilgili izinlerin verilmesinde, tarama ruhsatlarının düzenlenmesinde ve deniz dibi yapılarının projelendirilmesinde birincil yetkili kurumdur.
- **Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı**: Tarama faaliyetlerinin çevresel etkilerini izleyen ve ÇED sürecini yöneten ana kurumdur.
- **Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA)**: Deniz dibi jeolojik yapısının belirlenmesi, sediment analizleri ve zemin araştırmaları görev alanına girer.
- **Kıyı Emniyeti Genel Müdürlüğü**: Gemi trafiği güvenliğini ilgilendiren alanlarda tarama faaliyetlerinin seyir emniyetine etkisini değerlendirir.
- **İlgili Belediyeler ve İl Özel İdareleri**: Kıyı planlamaları, yapı ruhsatları ve tarama malzemesinin kıyı dolgu amacıyla kullanımı gibi konularda yetkilidir.

Bu çok başlı yapı, proje sahipleri açısından karmaşık bir izin süreci anlamına gelir. İlgili tüm kurumlar arasında etkin bir koordinasyon mekanizması bulunmaması, bazı projelerin aylarca beklemesine veya kaynakların israf edilmesine neden olabilmektedir. Bu durumun çözümü için kurumsal reform ve yasal uyumlaştırma çalışmaları gereklidir.

## 7.4 Mevzuat Eksiklikleri ve Uygulamada Karşılaşılan Sorunlar

Türkiye’de deniz dibi tarama faaliyetlerini doğrudan düzenleyen, bütüncül bir yasa veya yönetmeliğin bulunmaması uygulamada ciddi sorunlara yol açmaktadır. Mevcut mevzuat parçalı, dağınık ve çoğu zaman yorumlamaya açık hükümler içermektedir. Tarama faaliyetlerinin çevresel, teknik ve ekonomik boyutları farklı bakanlıkların ve yerel kurumların yetki alanına girdiğinden, uygulamada yetki karmaşası yaşanmakta; bu da sürecin yavaşlamasına ve zaman zaman durmasına neden olmaktadır.

En yaygın karşılaşılan sorunlardan biri, **ÇED süreçlerinin uzunluğu ve belirsizliği**dir. Her proje için standartlaştırılmış bir uygulama çerçevesi bulunmadığı için projeler arasında değerlendirme farklılıkları oluşabilmektedir. Ayrıca, bazı bölgelerde teknik kapasite yetersizliği nedeniyle gerekli ölçüm ve analizler zamanında yapılamamakta, bu da proje onay süreçlerini geciktirmektedir.

Tarama sonrası sedimentlerin bertarafı veya yeniden kullanımı konusunda da yasal bir boşluk bulunmaktadır. Bazı durumlarda sedimentin taranması kadar, bertarafının nereye ve nasıl yapılacağı konusundaki belirsizlik, projeyi ekonomik açıdan sürdürülemez hâle getirmektedir. Örneğin, deniz dolgusu yapılacaksa yerel idarelerden ayrı izinler alınması gerekebilmekte; bu da çok başlı bir süreç doğurmaktadır.

Ayrıca teknolojik gelişmelere paralel olarak mevzuatın güncellenmemesi, AUV ve ASV gibi otonom sistemlerin kullanımını yasal anlamda belirsiz hâle getirmektedir. Bu sistemlerin liman sahalarında kullanımı hakkında açık bir hüküm olmadığından, bazı yerel otoriteler bu tür uygulamalara mesafeli yaklaşmakta veya izin vermemektedir.

## 7.5 AB Uyumlaştırma Süreci ve Uluslararası Standartlar

Türkiye, Avrupa Birliği (AB) müktesebatına uyum süreci kapsamında deniz çevresinin korunması ve sürdürülebilir kullanımına yönelik birçok direktifi kabul etmiş ya da uyarılama çalışmalarına başlamıştır. Bunların başında **Su Çerçeve Direktifi (WFD)**, **Deniz Stratejisi Çerçeve Direktifi (MSFD)** ve **Habitat Direktifi** gelmektedir. Bu belgeler, tarama faaliyetlerinin doğrudan veya dolaylı etkilerini kontrol altına almayı hedeflemekte; biyolojik çeşitliliğin korunması, sediment kalitesi, su ekosistemlerinin dengesinin sürdürülebilirliği gibi başlıklarda katı ölçütler getirmektedir.

Türkiye’de bu uyum süreci **Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı** koordinasyonunda yürütülmekte olup, özellikle deniz izleme programlarının oluşturulması, çevresel veri tabanı sistemlerinin geliştirilmesi ve ÇED süreçlerinin şeffaflaştırılması yönünde ilerlemeler kaydedilmiştir. Ancak hâlâ birçok alanda mevzuat-tasarım-uygulama arasında kopukluklar mevcuttur.

Avrupa ülkelerinde olduğu gibi, Türkiye’de de tarama projelerinin daha bütüncül bir yaklaşımla ele alınması, **entegre kıyı alanı yönetimi (ICZM)** ilkeleriyle planlanması ve karar süreçlerinde kamusal katılımın artırılması gerekmektedir. Bu sayede sadece mevzuat uyumu değil; aynı zamanda toplumsal kabul, çevresel sorumluluk ve ekonomik sürdürülebilirlik birlikte sağlanabilir.



## 7.6 Değerlendirme ve Politika Önerileri

Deniz dibi tarama faaliyetleri, Türkiye açısından stratejik öneme sahip olmakla birlikte, mevcut yasal ve kurumsal yapı bu potansiyeli verimli şekilde değerlendirmekten uzaktır. Parçalı mevzuat yapısı, teknik eksiklikler, yetki karmaşası ve standart eksikliği, projelerin uygulanmasını geciktirmekte ve zaman zaman çevresel riskleri artırmaktadır. Bu durumun iyileştirilmesi için kısa, orta ve uzun vadede bazı politika önerileri şu şekilde sıralanabilir:

1. **Bütüncül Mevzuat Oluşturulması:** Deniz dibi tarama faaliyetlerini çevre, güvenlik, mühendislik ve finansman boyutlarıyla birlikte ele alan çerçeve bir yasa hazırlanmalıdır.
2. **Kurumsal Koordinasyonun Artırılması:** Ulaştırma, çevre, enerji ve bilimsel araştırma kurumları arasında veri paylaşımı ve karar süreçleri ortaklaştırılmalıdır.
3. **Dijitalleşmeye Uygun Mevzuat Güncellenmesi:** Otonom sistemlerin (AUV, ASV) kullanımı, veri tabanlı planlama araçları ve karar destek sistemleri yasal çerçeveye dahil edilmelidir.
4. **Yerli Yazılım ve Donanımın Teşviki:** Dijital tarama teknolojilerinin yerli üretimi için Ar-Ge destekleri artırılmalı ve kamu ihalelerinde bu sistemler teşvik edilmelidir.
5. **Eğitim ve Sertifikasyon Programları:** Liman işletmeleri ve teknik personel için çevre dostu tarama, veri analizi ve mevzuat eğitimi verilmelidir.

Sonuç olarak, yasal düzenlemelerin modernize edilmesi ve uygulayıcı kurumların dijital çağa uygun şekilde yeniden yapılandırılması, Türkiye'nin dijital denizcilik kapasitesini güçlendirecek ve uluslararası rekabette önünü açacaktır.

## 8. GELECEK ÖNGÖRÜLERİ VE YENİLİKLER

### 8.1 Otonom Sistemlerin Evrimi ve Yeni Nesil Platformlar

Günümüzde deniz dibi tarama operasyonlarında yaygın olarak kullanılan otonom sistemler (AUV, ASV, ROV) önemli ölçüde gelişmiş olsa da, bu teknolojilerin evrim süreci henüz tamamlanmış değildir. Önümüzdeki 10–15 yıl içinde otonom su altı sistemlerinin daha kompakt, enerji verimli ve karar alma yetisi yüksek platformlara dönüşmesi beklenmektedir.

Yeni nesil otonom araçlarda, **yapay zekâ tabanlı dinamik rota planlaması, çevresel koşullara duyarlı seyir algoritmaları ve modüler donanım sistemleri** öne çıkacaktır. Bu sistemler, sadece belirli görevleri yerine getirmekle kalmayacak; aynı zamanda kendi sistem sağlıklarını izleyip, arıza tahmini yapabilecek, görev sırasında öğrenerek kendilerini optimize edebilecek kapasiteye ulaşacaktır.

Örneğin, gelecekteki AUV modellerinin deniz tabanındaki mikroskobik habitatları analiz edebilmesi, belirli kimyasal değişimleri tespit edebilmesi ve sadece batimetrik değil, aynı zamanda biyolojik haritalama yapabilmesi beklenmektedir. ASV'lerde ise yapay zekâ ile yönlendirme, kalabalık liman alanlarında çarpışma riskini analiz etme ve liman trafiğiyle entegre olma gibi işlevlerin standart hâle gelmesi muhtemeldir.

Ayrıca çoklu otonom sistemlerin eş zamanlı, koordine şekilde çalıştığı "**fleet of drones**" sistemleriyle daha geniş alanların çok kısa sürede, çok düşük hata payıyla taranması mümkün olacaktır. Bu

gelişmeler, operasyonel verimliliği artırmakla kalmayacak, aynı zamanda tarama işlemini gerçek zamanlı, sürekli bir izleme sürecine dönüştürecektir.

## 8.2 Yapay Zekâ, Makine Öğrenmesi ve Tahmine Dayalı Sistemler

Yapay zekâ (YZ) teknolojisi, denizcilik ve özellikle deniz dibi tarama süreçlerinde önümüzdeki dönemin belirleyici unsurlarından biri hâline gelmektedir. YZ algoritmaları, sadece verilerin analizinde değil, aynı zamanda verilerin toplanma biçiminde, operasyonların yürütülmesinde ve karar alma süreçlerinde aktif rol oynamaktadır. Yapay zekâyâ dayalı sistemler, geniş veri havuzları üzerinde örüntüleri tanımlayarak karar destek süreçlerine katkı sunmaktadır.

Geleneksel analiz yöntemleri, operatörün deneyimine ve sınırlı parametrelere dayanırken; YZ destekli sistemler binlerce değişkeni eş zamanlı analiz edebilir, geçmiş verilerle karşılaştırabilir ve sonuçları saniyeler içinde karar vericiye sunabilir. Örneğin, bir AUV'nin geçmiş görevlerinden elde edilen veriler üzerinden makine öğrenmesiyle bir model geliştirildiğinde, benzer topografyaya sahip bir bölgede optimum tarama stratejisini sistem kendisi belirleyebilir.

Ayrıca **tahmine dayalı bakım (predictive maintenance)** sistemleri sayesinde, ekipman arızaları ortaya çıkmadan önce tespit edilebilir. Bu, sadece maliyet tasarrufu değil, aynı zamanda operasyon güvenliği açısından da büyük avantaj sağlar.

Geliştirilen algoritmalar; sediment birikimi eğilimlerini analiz ederek gelecekte hangi liman alanlarında ne zaman tarama ihtiyacı doğacağını önceden tahmin edebilir. Böylece kaynak planlaması daha etkili yapılır, gereksiz müdahaleler önlenir, çevresel etki azaltılır. Bu yaklaşım, liman işletmeleri için hem ekonomik hem çevresel sürdürülebilirliği güçlendiren bir araç hâline gelecektir.

## 8.3 Dijital İkiz ve Dinamik Simülasyon Teknolojileri

Dijital ikiz kavramı, gerçek dünya sistemlerinin dijital ortamda dinamik ve etkileşimli modelleri aracılığıyla temsil edilmesidir. Fiziksel bir sistemin gerçek zamanlı veri ile eş zamanlı olarak çalışan sanal modelidir. Bu teknoloji, denizcilik sektöründe sadece gemi mühendisliği ve liman planlaması gibi alanlarda değil, aynı zamanda deniz dibi tarama faaliyetlerinde de devrimsel bir potansiyele sahiptir.

Günümüzde dijital ikiz teknolojisi, belirli projeler için statik modellemelerle sınırlıdır. Ancak yakın gelecekte bu sistemlerin tam zamanlı veri entegrasyonu ile sürekli öğrenen ve gelişen sistemlere dönüşmesi beklenmektedir. Örneğin, bir limanın taban morfolojisi, sediment hareketi, su kalitesi, rıhtım derinliği ve akıntı verileri gibi farklı katmanlar bir araya getirilerek çok boyutlu bir dijital ikiz oluşturulabilir. Bu sayede herhangi bir tarama operasyonu başlatılmadan önce farklı senaryolar test edilebilir; kullanılan ekipmanın, uygulanacak yöntemin ve zamanlamanın çevresel ve ekonomik etkileri analiz edilebilir. Böyle bir sistem, karar destek mekanizması olmanın ötesine geçerek, **karar üretici** bir platform hâline gelir.

Gelecekte dijital ikiz sistemlerinin artırılmış gerçeklik (AR), sanal gerçeklik (VR) ve yapay zekâ destekli arayüzlerle zenginleştirilmesi; eğitim, planlama, bakım ve acil müdahale gibi farklı alanlarda yaygın şekilde kullanılması öngörülmektedir.

## 8.4 Sıfır Emisyon Hedefi ve Çevreci Teknolojiler

Küresel iklim krizi, denizcilik sektörünü de karbon salınımı açısından yeniden şekillendirmeye zorlamaktadır. Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO), 2050 yılına kadar denizcilikten kaynaklanan sera gazı emisyonlarını %50 oranında azaltmayı hedeflemekte; bu doğrultuda “**sıfır emisyon gemiler**” ve **çevreci operasyon teknikleri** üzerinde çalışmalar yürütmektedir. Deniz dibi tarama faaliyetleri de bu dönüşüm sürecinden bağımsız değildir.

Tarama gemileri, büyük motor gücü gereksinimleri nedeniyle yüksek miktarda fosil yakıt tüketmekte ve önemli düzeyde karbon salımı gerçekleştirmektedir. Gelecekte bu gemilerin **elektrikli veya hibrit motor sistemleriyle** donatılması, karbon ayak izinin düşürülmesini sağlayacaktır. Ayrıca, **biyoyakıtlar, hidrojen teknolojileri ve batarya destekli enerji sistemleri**, tarama faaliyetlerinde alternatif güç kaynakları olarak öne çıkmaktadır.

Enerji sistemlerine ek olarak, **çevre dostu tarama başlıkları, düşük türbülanslı pompa sistemleri, biyobozunur hidrolik yağlar ve akustik etkisi düşük sonar sistemleri** de çevresel etkilerin azaltılmasında önemli rol oynayacaktır. Bu sistemlerin yaygınlaşması, hem deniz ekosistemlerinin korunmasını hem de yeşil liman sertifikasyon süreçlerine entegrasyonu kolaylaştıracaktır.

Gelecekte, çevre izleme sensörlerinin tarama sistemlerine entegre edilmesiyle, **anlık su kalitesi değişimi, türbülans seviyesi, gürültü yayılımı** gibi faktörler operatörlere bildirilecek; gerektiğinde otomatik durdurma sistemleri devreye girecektir. Bu sistemler, çevresel hassasiyeti en üst düzeye taşıyarak sorumlu mühendislik uygulamalarının önünü açacaktır.

## 8.5 Türkiye İçin Gelecek Öngörülleri ve Stratejik Hedefler

Türkiye'nin üç tarafının denizlerle çevrili olması, liman sayısının hızla artması ve stratejik ticaret koridorları üzerinde bulunması, deniz dibi tarama faaliyetlerinin gelecekte çok daha kritik hâle geleceğini göstermektedir. Özellikle Karadeniz kıyılarındaki doğal gaz arama projeleri, Ege ve Akdeniz'deki yat limanı yatırımları ve Marmara'daki yoğun deniz trafiği, bu tür faaliyetlerin kapsamını artıracaktır.

Türkiye'nin bu süreçte dijitalleşmiş ve çevreye duyarlı tarama sistemlerine geçiş yapabilmesi için şu stratejik hedefleri belirlemesi gerekmektedir:

- **Ulusal Dijital Tarama Stratejisi:** Tüm limanların dijital haritalama, veri tabanlı yönetim ve görselleştirme altyapılarını ortak bir platformda birleştiren stratejik bir çerçeve oluşturulmalıdır.
- **Yerli Otonom Sistem Üretimi:** TÜBİTAK, ASELSAN, HAVELSAN gibi kurumlarla iş birliği yapılarak, yerli AUV/ASV sistemleri geliştirilmeli ve bu sistemler kamu projelerinde teşvik edilmelidir.
- **Çevre Duyarlı İhale Kriterleri:** Liman altyapı projelerinde çevreci teknoloji kullanımını teşvik eden, düşük karbon ayak izi ve sürdürülebilirlik puanlaması içeren ihale sistemleri kurulmalıdır.
- **Eğitim ve Ar-Ge Yatırımları:** Üniversitelerde bu alana özel yüksek lisans/doktora programları açılmalı; sektörle iş birliği içinde uygulamalı projeler desteklenmelidir.

Eğer bu hedefler uzun vadeli bir stratejiyle desteklenirse, Türkiye sadece uygulayıcı değil, aynı zamanda **bölgesel bir teknoloji sağlayıcısı** konumuna yükselebilir.

## 8.6 Değerlendirme ve Stratejik Vizyon

Deniz dibi tarama faaliyetleri, geçmişte sadece mühendislik ve altyapı geliştirme faaliyeti olarak görülürken; günümüzde çok disiplinli bir yaklaşımı zorunlu kılan, veri odaklı, çevreci ve stratejik bir alana dönüşmüştür. Otonom sistemlerin yaygınlaşması, yapay zekâ destekli analiz araçlarının gelişmesi ve dijital ikiz gibi teknolojilerin yaygın kullanımı, bu dönüşümün en somut göstergeleridir.

Gelecekte bu teknolojiler sadece operasyonel verimlilik sağlamakla kalmayacak; aynı zamanda deniz çevresinin korunması, doğal kaynakların sürdürülebilir kullanımı ve iklim değişikliğiyle mücadelede de kritik roller üstlenecektir. Bu nedenle tarama faaliyetleri, **mühendislik çözümleriyle sınırlı değil, aynı zamanda bir çevre politikası, veri politikası ve kamu stratejisi** olarak ele alınmalıdır.

Türkiye için stratejik vizyon, sadece mevzuat ve uygulamada değil; aynı zamanda teknoloji geliştirme, akademik bilgi üretimi ve bölgesel iş birliği alanlarında da liderlik hedeflemelidir. Denizcilikte dijitalleşme ve çevresel sürdürülebilirlik birlikte ele alındığında hem ekonomik kalkınma hem de uluslararası saygınlık açısından önemli kazanımlar elde edilecektir.

## 9. SONUÇ VE ÖNERİLER

### 9.1 Genel Değerlendirme

Bu proje kapsamında deniz dibi tarama faaliyetlerinin dijital dönüşümü, teknik, ekonomik, çevresel ve yönetsel açılardan kapsamlı şekilde incelenmiştir. Özellikle son yıllarda artan liman trafiği, kıyı yapılaşması ve denizcilik yatırımları, deniz dibi tarama faaliyetlerini kaçınılmaz bir mühendislik hizmeti hâline getirmiştir. Bu faaliyetlerin, dijitalleşme ve otonom sistemlerle yeniden yapılandırılması hem verimlilik hem de sürdürülebilirlik açısından yeni bir dönemin başlangıcına işaret etmektedir. Proje boyunca incelenen başlıklar göstermiştir ki, klasik yöntemlere kıyasla dijital sistemlerin kullanımı sadece teknik doğruluk sağlamakla kalmamakta; aynı zamanda zaman, enerji ve maliyet açısından ciddi avantajlar sunmaktadır. Otonom su altı araçları, sensör tabanlı veri toplama sistemleri, yapay zekâ algoritmaları ve dijital ikiz uygulamaları gibi teknolojiler, tarama süreçlerini çok daha bütüncül ve sürdürülebilir bir yapıya dönüştürmüştür.

Ancak bu teknolojik ilerlemenin tüm avantajlarına rağmen, mevzuat eksiklikleri, eğitim yetersizlikleri, ilk yatırım maliyetlerinin yüksekliği ve kurumsal koordinasyon sorunları, Türkiye’de dijital denizcilik altyapısının gelişimini sınırlamaktadır. Bu nedenle stratejik yaklaşımlara ve uzun vadeli eylem planlarına duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır.

### 9.2 Dijitalleşmenin Katkıları

Projede ulaşılan en önemli sonuçlardan biri, dijitalleşmenin tarama faaliyetlerine sağladığı çok yönlü katkılardır. Bunlar aşağıda özetlenmiştir:

- **Teknik Doğruluk:** Çok huzmeli sonarlar ve hassas konumlandırma sistemleriyle elde edilen veriler, klasik yöntemlere kıyasla daha düşük hata payı ve daha yüksek hassasiyet sunar.

- **Operasyonel Verimlilik:** Otonom sistemlerin 24 saat kesintisiz çalışabilme kapasitesi, zaman tasarrufu ve insan kaynaklı hataların azalması gibi avantajlar sağlar.
- **Gerçek Zamanlı İzleme ve Müdahale:** Gerçek zamanlı veri analizi ile sahadaki gelişmelere anlık müdahale imkânı doğur.
- **Karar Destek Süreçleri:** Görselleştirme ve yapay zekâ sistemleri, çok değişkenli analizler yaparak karar vericilere daha net seçenekler sunar.
- **Çevresel Sürdürülebilirlik:** Sediment yayılımını azaltan ekipmanlar, çevre dostu enerji sistemleri ve anlık çevre izleme sensörleri, çevresel etkileri minimize eder.

### 9.3 Karşılaşılan Sorunlar

Dijital teknolojilerin deniz dibi tarama operasyonlarına entegrasyonu, çeşitli avantajlar sunsa da uygulama aşamasında bir dizi sorun ve sınırlamayla karşılaşılmaktadır. Bu sorunların başlıcaları şunlardır:

- **Mevzuat Uyumsuzluğu:** Türkiye’de deniz dibi tarama uygulamalarını doğrudan kapsayan kapsamlı ve özel bir yasal çerçevenin eksikliği dikkat çekmektedir. Bu durum, özellikle otonom sistemlerin kullanımı gibi yenilikçi uygulamalarda belirsizlik yaratmaktadır.
- **Yüksek İlk Yatırım Maliyeti:** Otonom sistemler, sensör teknolojileri, yazılım lisansları ve veri yönetim altyapısı gibi unsurlar yüksek yatırım bütçesi gerektirmektedir. Bu durum, küçük ölçekli limanlar veya kamu kurumları için ciddi bir engel teşkil etmektedir.
- **Teknik Personel Eksikliği:** Gelişmiş sistemlerin kurulumu ve kullanımı, çok disiplinli teknik bilgi ve deneyim gerektirmektedir. Türkiye’de bu alanda uzman personel sayısı sınırlı olduğu için, sistemlerin etkin kullanımı zaman zaman mümkün olamamaktadır.
- **Kurumsal Koordinasyon Sorunları:** Çeşitli kamu kurumları (UAB, Çevre Bakanlığı, MTA, belediyeler) arasında yetki çakışmaları ve bilgi paylaşımı eksikliği bulunmaktadır. Bu da projelerin onay süreçlerini uzatmakta ve kaynakların etkin kullanımını engellemektedir.
- **Veri Güvenliği ve Entegrasyon Problemleri:** Veri tabanlı sistemlerin yaygınlaşması, beraberinde siber güvenlik risklerini ve altyapı uyumsuzluklarını da getirmiştir. Farklı sistemlerin entegre çalışması hâlâ zorluk yaratmaktadır.

### 9.4 Öneriler (Kısa – Orta – Uzun Vadeli Strateji)

#### Kısa Vadeli (1–2 Yıl)

- **Farkındalık ve Eğitim Programları:** Liman işletmeleri, kamu personeli ve mühendisler için dijital sistemler ve veri yönetimi konularında uygulamalı eğitimler düzenlenmelidir.
- **Pilot Uygulamalar:** Seçilen limanlarda dijital sistemlerin kullanıldığı küçük ölçekli deneme projeleri teşvik edilerek, sistemin etkinliği yerel düzeyde test edilmelidir.
- **Veri Paylaşım Protokolleri:** Kamu kurumları arasında veri paylaşımı ve koordinasyonunu sağlayacak yasal çerçeve oluşturulmalıdır.

#### Orta Vadeli (3–5 Yıl)

- **Yasal Düzenlemelerin Güncellenmesi:** Otonom sistemlerin, çevreci ekipmanların ve veri tabanlı yönetim araçlarının yasal altyapıya entegre edilmesi sağlanmalıdır.

- **Yerli Yazılım ve Donanım Teşviki:** TÜBİTAK ve KOSGEB destekleri artırılarak, yerli sensör, haritalama yazılımları ve AUV-ASV sistemlerinin üretimi desteklenmelidir.
- **Ulusal Dijital Denizcilik Platformu:** Tüm tarama, batimetrik ve çevresel verilerin merkezi olarak toplandığı bir dijital portal geliştirilmelidir.

### Uzun Vadeli (5+ Yıl)

- **Dijital İkiz ve Yapay Zekâ Tabanlı Karar Sistemleri:** Tüm büyük limanların dijital ikiz sistemleriyle yönetildiği ve yapay zekâ ile desteklenen karar sistemlerinin standart hâle geldiği bir yapı hedeflenmelidir.
- **Akademi-Sanayi İş Birlikleri:** Üniversiteler ve sektör arasında yürütülen ortak araştırmalarla teknolojik gelişim hızlandırılmalıdır.
- **Çevresel Sertifikasyon Sistemi:** Dijitalleşme, sıfır atık ve düşük emisyon gibi çevresel göstergelere dayalı bir “yeşil liman sertifikası” uygulamaya konulmalıdır.

### 9.5 Akademik ve Stratejik Sonuç

Bu çalışma, deniz dibi tarama faaliyetlerinin klasik mühendislik uygulamalarının ötesinde; dijitalleşmenin, veri yönetiminin, çevresel sürdürülebilirliğin ve uluslararası mevzuatın iç içe geçtiği karmaşık bir alan olduğunu göstermiştir. Geleceğin liman altyapısı ve kıyı yönetimi ancak bu çok disiplinli yapının doğru analiz edilmesiyle başarılı olabilir.

Türkiye'nin bu süreçte pasif kullanıcı değil, **teknoloji geliştiren ve ihraç eden** bir aktör hâline gelmesi mümkündür. Bunun için sistematik bir strateji, kararlı politikalar ve uzun vadeli vizyon gereklidir. Bu proje, dijital dönüşümün yalnızca bir teknoloji yatırımı değil; aynı zamanda **veri temelli bir yönetim modeli** olduğunu ortaya koymuştur.

Gelecekte, limanlar sadece yük elleçlenen yapılar değil; aynı zamanda **veri üreten ve bu veriyi stratejik faydaya dönüştüren merkezler** olacaktır. Bu dönüşümün öncüsü olmak için bugün yapılacak yatırımlar ve atılacak adımlar, yalnızca sektörü değil; deniz çevresini, ekonomiyi ve ulusal kapasiteyi doğrudan etkileyecektir.

**KAYNAKLAR**

- Aydemir, S. (2020). *Limanlarda deniz dibi tarama faaliyetlerinin planlanması ve uygulama süreçleri*. İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları.
- Bilgili, L., & Akçalı, B. (2019). Türkiye’de kıyı mühendisliği uygulamalarında veri yönetimi. *İnşaat Teknolojileri Dergisi*, 15(4), 35–42.
- IMO – International Maritime Organization. (2021). *Guidelines for the Management of Dredged Material*. Retrieved from <https://www.imo.org>
- Kaya, M. (2021). Otonom sistemlerin denizcilik sektörüne etkileri. *Mühendislik ve Teknoloji Dergisi*, 12(3), 55–67.
- Kongsberg Maritime. (2022). *Autonomous Underwater Systems for Ocean Mapping*. Retrieved from <https://www.kongsberg.com>
- Ministry of Transport and Infrastructure (UAB). (2020). *Kıyı ve Limanlar Yönetmeliği*. T.C. Resmî Gazete.
- NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration. (2020). *National Oceanographic Mapping Strategy*. United States Department of Commerce.
- TUBITAK MAM. (2023). *Karadeniz kıyı morfolojisinin takibi projesi raporu*. Marmara Araştırma Merkezi Yayınları.
- Yıldız, A. (2022). Dijital ikiz uygulamalarının altyapı projelerine entegrasyonu. *Yapı ve Ulaştırma Dergisi*, 18(1), 88–95.
- Zhang, Y., & Chen, L. (2022). Real-time 3D mapping techniques in shallow water dredging. *Marine Technology Journal*, 56(2), 23–37.
- MARPOL. (1973/78). *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships*. International Maritime Organization.
- Avrupa Komisyonu. (2010). *Marine Strategy Framework Directive (MSFD)*. Retrieved from <https://environment.ec.europa.eu>
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2021). *Çevresel Etki Değerlendirmesi Yönetmeliği*. T.C. Resmî Gazete.





//

# Bölüm 3

## TÜRKİYE'DE SU AYAK İZİ KAVRAMI VE ÖNEMİ

*Abdullah YİNANÇ<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Doç, Dr. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, ayinanc@nku.edu.tr ORCID: 0000-0002-8144-8266

## Giriş

Dünyadaki tüm canlılar enerji için suya bağımlıdır, bu da suyu hayati bir enerji kaynağı haline getirir. Hızlı nüfus artışı, ekonomik gelişme, endüstriyel genişleme, değişen iklim koşulları gibi faktörler nedeniyle tatlı su kaynakları şu anda tükenmektedir (Hogeboom vd., 2018). İnsan faaliyetleri nedeniyle büyük miktarda su kullanılıyor ve kirleniyor. Gelecekteki beslenme alışkanlıklarının değişmesi ve nüfus artışının su talebini artıracığı öngörülmüyor. Artan gıda talebini karşılamak ve yoksulluğu ve açlığı sürdürülebilir bir şekilde azaltmak için tarımda etkili su yönetimi uygulanmalıdır (Mekonnen ve Gerbens-Leenes, 2020). Yaşam, günlük hayatın her aşamasında kullanılan yenilenebilir bir doğal kaynak olan suya bağlıdır. Yenilenebilir olmasına rağmen, kıtalardan okyanuslara kadar yüzey ve yeraltı sularının çıkarılması nedeniyle kullanılabilir tatlı su miktarı azalmaktadır. İnsan kullanımına uygun tatlı su kaynakları tuzlu suyla birleşerek, kullanılabilir su kaynakları tükenmektedir (Scanlon vd., 2023).

Bilgi ve iletişim teknolojileri alanındaki son değişikliklerin bir sonucu olarak, işletmelerin temel politika ve süreçlerinde değişiklikler meydana gelmiştir. Modern toplumların merkezindeki en önemli adımlardan birisi endüstriyel değişimdir (Yılmaz, 2020). Sanayileşmeyle birlikte teknolojik gelişmelerin ve enerji ihtiyacının yükselmesi, fosil yakıtların tüketiminin artması, kentleşme sorunları, teknolojik gelişmeler ve nüfusun artışı gibi gelişmeler küresel bir sorun teşkil eden çevre sorunlarının temelini oluşturmaktadır (Şenocak vd. 48). Çevre sorunları sonucunda orataya çıkan yüksek karbondioksit emisyonları, yükselen küresel sıcaklıklar, hava kirliliği, şiddetli kuraklıklar ve seller, su kıtlığı, su kaynaklarının aşırı kullanımı ve kirlenmesi ile yüksek azot ve fosfor emisyonları ise insan faaliyetlerinin etkileridir. İnsanların doğal süreçleri nasıl etkilediğini ölçmek için, çevresel, ekolojik, karbon, su, toprak ve azot ayak izleri gibi çeşitli ayak izi yaklaşımları geliştirilmiştir (Matušík ve Kočí, 2021). Geliştirilen bu yaklaşımlar, insanoğlunun çevresel sorunlarını farketmiş olmasının ve çözüm bulmak istemesinin bir sonucu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bugün gelinen noktada insanların çevrenin esas değerini korumaya yönelik çalışmalar yapması ve insanı merkeze alan yaklaşımdan uzaklaşmasının elzem olduğunu kabul etmek gerekmektedir (Cansaran,2014).

Ekosistem ve yaşam, hassas ve sınırlı bir kaynak olan temiz suya bağlıdır. Şimdiye kadar, insanların bu kaynağı kötüye kullanması, suyla ilgili ciddi çevre sorunlarına yol açmıştır. Dünyanın birçok bölgesinde, çok sayıda yüzey ve yeraltı su kaynağı kirlenmiştir ve hala azalmaktadır. Sonuç olarak, ekosistemler ve topraklar onarılamaz bir zarara uğramıştır. Dünya nüfusu arttıkça, daha fazla insan mal ve hizmet tüketecek, bu da üretimi artıracak ve dolayısıyla bu süreçte kullanılan su miktarını artıracaktır. Su kullanımını düzenlemek için suyun kullanımlarını incelemek çok önemlidir (Hogeboom, 2020). Su, azalması ve kirliliği açısından günümüz çevre ve insan sorunsallarının başında gelmektedir. Bu yüzden bu sorunsal için de sürdürülebilir politikalar üretebilmek gerekir (Cansaran, 2019). Bunun içindir ki işletmelerin de faaliyetlerinin değerlendirilmesinde özel bir ekonomik sürdürülebilirlik seti geliştirilmiştir. Geliştirilen bu set sonuçlarına göre; gelir, maliyet etkinliği, istikrar ve verimlilik en popüler olanlar arasında sayılmaktadır (Badem ve Hurma 2025).

Allan (1993) tarafından geliştirilen sanal su tanımı, su ayak izi kavramının temelini oluşturmaktadır (Jeswani ve Azapagic, 2011). Bu iki kavram çeşitli açılardan farklılık sergilemektedir. Su ayak izi, üretim süreci esnasında dolaylı ya da doğrudan kullanılmakta olan tatlı sutür ve miktarını ortaya koyan kapsamlı bir göstergedir, sanal su ise sadece bir üründe bulunan su miktarını ifade etmektedir (Ercin ve Hoekstra, 2014).

## 1. SU AYAK İZİ KAVRAMI

Çevreye verilen zararı en aza indirecek ürünler geliştirme ihtiyacı giderek daha belirgin hale gelmektedir. Ürünler, insan ihtiyaçlarını karşılamada önemlidir, ancak bu noktada çevreye verilen zararın etkileri ve doğal kaynakların tükenmesi göz ardı edilmemelidir (Mercan ve Çetin, 2022: 124). Küresel üretim endüstrisi, ekonomik büyümeyi çevresel sürdürülebilirlikle dengelemek için artan bir baskıyla karşı karşıyadır ve bu da üretim ve tüketim kalıplarının kritik bir şekilde yeniden değerlendirilmesini gerektirir. Bu zorluk, iklim değişikliğinin, kaynak tükenmesinin ve ekosistem bozulmasının artan sonuçlarıyla daha da kötüleşerek, ürünleri nasıl tasarladığımız, ürettiğimiz ve tükettiğimiz konusunda temel bir değişim talep etmektedir (Mercan, 2025: 461). Terim olarak su ayak izi bir mal veya hizmetin üretiminden nihai tüketimine kadar (tedarik zinciri boyunca) kullanılan toplam su miktarı “su ayak izi” olarak bilinir (Mekonnen, 2011). Su ayak izi, toplam su miktarının yanı sıra, suyun kalitesine ve kullanımına göre kullanılan su türünü de gösterir (Muratoglu, 2020). Hoekstra'nın 2002 yılında “su ayak izi kavramını” önermesinden sonra, bir ürün veya hizmetin tüm tedarik zinciri esnasında su kullanımını ölçme düşüncesi ilgi görmeye başladı (Hoekstra et al., 2011: 2). Belirli bir alanda bir yıl boyunca tüketilen su miktarı ( $m^3$ /yıl cinsinden ölçülür) su ayak izi olarak bilinir (Chapagain vd., 2006). Ayrıca, tarımsal üretim ve su verimliliğinin bir ölçütüdür (Morillo vd., 2015: 595). İnsanlar veya işletmeler tarafından bir mal veya hizmetin üretilmesi veya tüketilmesi için kullanılan temiz su kaynaklarının toplam miktarı, “insanların veya herhangi bir endüstrinin su ayak izi” olarak adlandırılır (Water Footprint Network, 2012).

İnsanlar, topluluklar veya ülkeler tarafından tüketilen mal ve hizmetlerin üretiminde kullanılan tatlı su miktarını ölçen bir gösterge “su ayak izi” olarak bilinir. Ürün birimi başına kullanılan veya kirlenen su miktarı bu şekilde ifade edilir. Su ayak izini göstermek için genellikle ton başına tüketilen su miktarını metreküp ( $m^3$ ) cinsinden ifade eden  $m^3$ /ton birimi kullanılır. Su ayak izine hem doğrudan hem de dolaylı su kullanımı dahildir. İçme suyu için kullanılan su doğrudan su kullanımı olarak adlandırılırken, pestisitler ve gübreler gibi kirletici maddeleri gidermek için kullanılan su dolaylı su kullanımı olarak adlandırılır (Chapagain vd., 2017).

Su kaynaklarının kullanımının gıda üretiminden önemli ölçüde etkilendiği sıklıkla bilinmektedir. Gıda üretimi, küresel olarak kullanılan suyun %92'sini oluşturmaktadır. Hayvansal gıda üretimi, tarımda kullanılan suyun %29'unu doğrudan veya dolaylı olarak kullanmaktadır. Bitkisel beslenmeyle karşılaştırıldığında, hayvansal gıdalar birim enerji başına daha fazla suya ihtiyaç duyar (Mekonnen ve Gerbens-Leenes, 2020). Pegram ve ark. (2014) göre, bir fincan çay 30 litre su, bir dilim ekmek 40 litre, bir fincan kahve 208 litre, bir parça kırmızı et 3.100 litre ve bir hamburger 2.400 litre su tüketir. Bunlar, günlük olarak sıklıkla tükettiğimiz bazı şeylerdir. Ayrıca, su ayak izi zaman ve mekana göre değişen çok yönlü bir ölçüttür (Feng vd., 2021). Bir bölgede ekilen bir mahsulün su ayak izi, başka bir bölgede yetiştirilen bir mahsulün su ayak izinden farklı olabilir (Dang vd., 2022). Benzer şekilde, bir bölgede yetiştirilen veya üretilen herhangi bir ürünün su ayak izi zamanla değişebilir (Zhuo vd., 2016).

Muratoğlu'na (2018) göre, su ayak izi sadece su miktarını değil, aynı zamanda suyun türünü, konumunu ve kullanım yöntemini de ayrıntılı olarak gösterir. Su ayak izi, bu bağlamda çok yönlü bir ölçü olarak görülür. Ancak su ayak izi, genel olarak dolaylı ve doğrudan su kullanımını dikkate almayı gerektiren bir kavram olduğu için eski metodolojilerle aynı şekilde ele alınmaz (Dumont vd., 2013). Su ayak izi, üreticinin veya tüketicinin doğrudan ve dolaylı su tüketimini dikkate alan çok yönlü bir göstergedir. Ayrıca, kullanılan suyun türü, nerede ve ne zaman kullanıldığı hakkında bilgi veren bir araç görevi de görür (Pegram vd., 2014).

Su ayak izi kavramı, ekonomide suyun değerini ve ekonomik büyüme süreçlerinde su yönetiminin önemini ortaya koyan bir çerçeve sunmaktadır. Ekonomik faaliyette suyun rolüne dayalı olarak, bir ülkenin su ayak izi yöneticilere, yatırımcılara ve planlamacılara çeşitli karar alma süreçleri için gerekli bilgileri sağlamaktadır (Hoekstra vd., 2011: 17). Su ayak izi, tüketilmekte olan mal ve hizmetlerle bağlantılı olduğu için (Fulton vd., 2012), çeşitli tüketici faaliyet düzeylerinde (örneğin, insanlar, aileler, bölgeler, eyaletler, ülkeler ve hatta tüm insanlık için) hesaplanabilir.

### 1. Su ayak izinin bileşenleri

Mavi, yeşil ve gri su ayak izleri, su ayak izini oluşturan üç farklı bileşendir. Bu bileşenlerin her biri, su kullanımının türüne ve ekosistem üzerindeki etkilerine bağlı olarak değişiklik gösterdiğinden, bu bileşenleri anlamak, sürdürülebilir su yönetimi stratejileri oluşturmaya ve suyu daha verimli kullanmaya yardımcı olur. Su kullanımını kontrol etmek ve su döngüsünün gerçekleşmesi için elverişli koşullar yaratmaya çalışmak, su ayak izi bileşenlerinin tanıtılmasının arkasındaki ana itici güçlerdir. (Artar ve Öztaş Karlı, 2021: 147). Su ayak izinin bileşenleri Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Su ayak izinin bileşenleri

Mavi, yeşil ve gri su ayak izleri, su ayak izinin ayrıldığı üç bileşenidir. Su ayak izi, doğrudan kullanılan kaynakların yanı sıra çeşitli bileşenlerini de dikkate alarak su kullanımını değerlendiren bir kavramdır. Yüzey ve yeraltı sularının kullanımı “mavi su ayak izi” olarak adlandırılırken, bitkilerde ve endüstriyel süreçlerde yağmur suyunun kullanımı “yeşil su ayak izi” olarak adlandırılır. Faaliyetlerin neden olduğu kirliliği nötralize etmek için gereken su miktarı, gri su ayak izi ile gösterilir. Bu üç faktör toplu olarak dikkate alındığında, su kullanımı ve kirliliğine ilişkin daha eksiksiz bir tablo ortaya çıkar.

#### 1.1. Mavi ayak izi

Nehirlerden, doğal ve yapay rezervuarlardan ve yeraltı su kaynaklarından üretim ve tedarik sürecinde kullanılan tatlı su miktarı, “mavi su ayak izi” şeklinde adlandırılır (Masud vd., 2018). Ev, endüstri ve tarım amaçlı su kullanımının su ayak izi, mavi su ayak izi dikkate alınarak hesaplanır (Fereses vd., 2017). “Mavi su ayak izi” terimi, bir ürün veya hizmetin üretim sürecinde ve müşteri tarafından

tüketilene kadar kullanılan yüzey veya yeraltı suyu miktarını ifade eder. Mavi suyun aşırı kullanımı, sınırlı su kaynakları olarak kabul edilen yüzey ve yeraltı sularını tehlikeye atmaktadır. Ancak, sulama ağları ve işletme ve bakım ücretleri gibi maliyetler nedeniyle mavi su kullanımı pahalıdır (Engin, 2019).

Ürün ve hizmetlerin yaratılmasında kullanılan yüzey ve yeraltı suyu miktarı “mavi su ayak izi” olarak adlandırılır. Bu, üretim hacminin tüketilen toplam mavi su miktarına bölünmesiyle hesaplanır. Ev, endüstri ve tarım amaçlı kullanım için büyük miktarda suyu ucuz bir şekilde depolama kapasitesine sahip göller, nehirler ve gözenekli jeolojik oluşumlardan ne kadar su çıkarıldığını hesaplar. Erişilebilir yüzey veya yeraltı su havzalarından denizlere, göllere veya diğer yerlere geri buharlaşan su, mavi su ayak izinde bahsedilen su kaybıdır. Tarımsal sulamanın gerekli olduğu kurak bölgelerde, bu çok önemli bir unsurdur (Erçin ve Hoekstra, 2014).

Mavi su kullanımının çevresel etkisi, yeşil su kullanımının çevresel etkisinden daha yüksektir (Chapagain vd., 2006: 201). Mavi suyun kullanım maliyeti yeşil su kullanımının maliyetinden daha yüksektir. Mavi su kullanımının azaltılması üretim maliyetlerini düşürür ve çevre üzerinde olumlu bir etki yaratacaktır. Yeşil su miktarı, sulama etkinliği, ürünlerin su kısıtlamasına toleransı ve ürün türü, tarım sektöründe mavi suyu etkiler. Yeşil su yeterli olmadığında mavi su kullanılır (Lovarelli vd., 2016: 238).

## 1.2. YEŞİL AYAK İZİ

İnsan faaliyetlerinin neden olduğu su kirliliği, gri su ayak izi ile gösterilir (Ge vd., 2016; Ricardo vd., 2019). Yüzey veya yeraltı sularına giren kirliletti maddeleri emmek için gerekli olan tatlı suyun miktarı “gri su ayak izi” olarak bilinir. Arıtmaya ayrılan yüzde nedeniyle, gri su ayak izi, su kirliliğinin yüksek aynı zamanda su kalitesinin düşük olduğu yerlerde daha büyüktür (Hoekstra vd., 2011). Su kirliliğinin derecesini ölçmek için bir gösterge görevi görür. Sandu ve Virsta'ya (2021) göre, mevcut su kalitesini uygun bir düzeye yükseltmek için kullanılan yeni su miktarıdır. Mevcut su ortamının kalite kriterlerine uygun olarak kirlilik yükünü dengelemek için gereken tatlı su miktarı, gri su ayak izi ile temsil edilir. Nüfus artışı ve endüstriyel gelişme, gri su ayak izinin boyutunu artırmaktadır, çünkü gri su kirlilikle doğrudan ilişkilidir (Mekonnen ve Hoekstra, 2011).

Hoekstra, gri su ayak izinin, tatlı suyun kaynaklarına doğrudan salınan noktasal kaynaklardan kaynaklanan kirliliğin veya geçirimsiz yüzeylerden, topraktan ya da farklı dağılık kaynaklardan sızıntı veyahut akış yolu ile suyun kaynağına dolaylı olarak giren kirliliğin sonucu olabileceğini iddia etmektedir (WFN, 2021).

## 1.3. YEŞİL AYAK İZİ

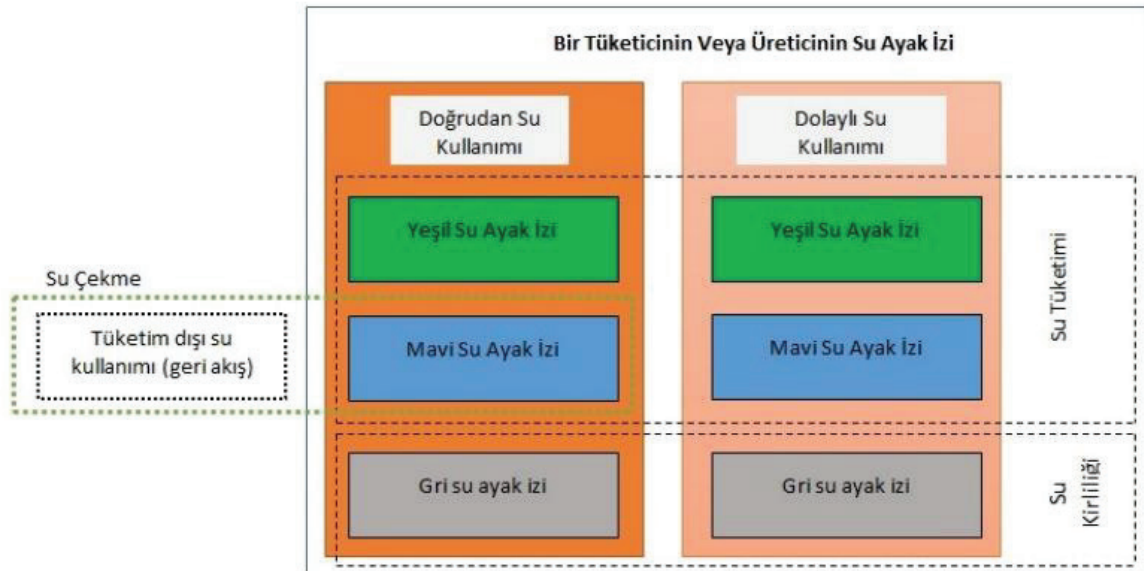
“Yeşil su ayak izi” olarak bilinen bir kavram, bir mal veya hizmetin üretim süreci boyunca ne kadar yağmur suyunun kullanıldığını hesaplar. Mavi su bu bağlamda daha yaygın olarak kullanılırken, yeşil su sadece tarımsal üretimde kullanılır. Ayrıca, yeşil su, toprak nemi olarak bulunan yağmur suyu olduğu için mavi sudan daha kolay elde edilir (Avanoz, 2020).

Yüzey akışı ve yeraltı suyu yenilenmesi hariç, yeşil su, karada kalan ve bitki örtüsü ile üst toprak katmanlarında depolanan yağış miktarıdır. Mavi su ayak izi gibi, yeşil su ayak izi de insanlar tarafından ne kadar su tüketildiğini ve mal ve hizmetlerin üretiminde ne kadar yağmur suyu kullanıldığını gösterir (Hoekstra vd., 2009). Ancak mavi su ayak izine kıyasla, yeşil su ayak izi daha sınırlıdır ve öncelikle tarımsal üretim yoluyla su kaynaklarının dolaylı kullanımını yansıtır (Veetil ve Mishra, 2016).

Su sistemleri, yeşil, mavi ve gri su ayak izlerinden farklı şekilde etkilenir. Bir nehir havzasındaki yağış miktarı, kullanılabilir su kaynaklarının miktarını sınırlar. Havzanın su içeriğine katkıda bulunan yağışların havzadan çıkmasının iki yolu, buharlaşma (yeşil su) veya okyanuslara akış (mavi su)dır. Ormanlar veya tarım alanları aracılığıyla, “yeşil su” olarak da bilinen bu buharlaşma akışları kullanılabilir. Buharlaşma akışları, atmosferde kaybolmak yerine bu şekilde etkili bir şekilde kullanılır. Yeşil su gibi, havzada genellikle “mavi su” olarak bilinen yüzey akışı, akiferlerden ve nehirlerden çıkarıldıktan sonra ev, tarım veya endüstriyel kullanımlar için kullanılabilir. Bu sayede, yüzey akışı okyanuslara ulaşmak yerine iyi bir şekilde kullanılabilir. Havzanın yüzey akışı, seyreltme suyu ihtiyacını gösteren gri su ayak izine eşit olduğunda, havzanın maksimum sürdürülebilir gri su ayak izi miktarına ulaşılır (Hoekstra, 2014: 33).

## 2. DOĞRUDAN VE DOLAYLI SU AYAK İZİ

Mal ve hizmetlerin doğrudan ve dolaylı tatlı su tüketimi de su ayak izini hesaplamak için kullanılabilir (Hoekstra, 2015).



Şekil 2. Su ayak izinin bileşenleri şematik olarak gösterilmiştir.

Kaynak: Hoekstra vd., (2011).

Tüketici veya üretici tarafından kullanılan ve kirlenen tatlı su miktarı “doğrudan su ayak izi” olarak bilinir (Hoekstra vd., 2009).

Tüketicilerin tükettiği mal ve hizmetlerin üretimi veya üreticilerin kullandığı girdiler sonucunda kullanılan ve kirlenen tatlı su miktarı, dolaylı su ayak izi olarak bilinir (Hoekstra vd., 2009). Bu, tüketilen malların üretimi için ne kadar su kullanıldığını gösterir. Bu süreç, tedarik zincirini ve hammadde ve ara ürün üretiminin aşamalarını içerir. Başka bir deyişle, bir mal veya hizmetin geliştirilmesi sırasında kullanılan veya kirlenen suyun çevresel etkisidir (WFN, 2021).

## 3. Su ayak izini azaltma yöntemleri

İnsanların su kaynaklarındaki etkilerini azaltabilmek ve sürdürülebilir bir çevreyi desteklemek adına su ayak izlerini azaltmaları gerekmektedir. Su ayak izini azaltmak için çeşitli stratejiler vardır ve bu

stratejiler aynı zamanda insanların bilinçli tüketim alışkanlıkları benimsemelerine de yardımcı olmaktadır (Hoekstra ve Chapagain, 2008).

Su kullanımını azaltmak için bazı stratejiler şunlardır (Bulut ve Şahin, 2020): İnsanlar su ayak izlerini azaltmak için bir dizi önlem alabilirler. Bu konudaki farkındalığı artırmak için, insanlar öncelikle kişisel su ayak izlerini hesaplamalı ve su kaynaklarını nasıl etkilediğinin farkına varmalıdır. İnsanlara su tasarrufunun ne kadar önemli olduğu sürekli olarak hatırlatılmalı ve su kullanımını artıran kötü alışkanlıklardan vazgeçmeleri için teşvik edilmelidir. Tüketim kararlarında enerji ve su tasarrufu faktörleri dikkate alınmalı ve su ayak izlerini en aza indirmeyi amaçlayan sivil toplum kuruluşlarının girişimlerine katılım teşvik edilmelidir. Geleneksel sulama sistemleri yerine çağdaş sulama sistemlerinin benimsenmesi, su tasarruflu ürünlerin seçilmesi ve yeraltı sularını kirleten tehlikeli tarım kimyasallarının kullanımının azaltılması, tarımda çok önemlidir. Sürdürülebilir su yönetimine doğru atılacak önemli bir adım da, atık suyu arıtmak için su arıtma cihazlarının kullanılması olacaktır.

#### 4. Türkiye'nin Su Ayak İzi

Türkiye'de artan nüfus, gelişen şehirler ve endüstrisi sebebiyle su kıtlığı çekmekte olan bir ülke olarak çeşitli zorluklar ile karşı karşıyadır. Tahminler, 2030'a kadar Türkiye'de ciddi su kıtlığı olacağını öngörmektedir. Ayrıca, ülkenin geleceği su kaynaklarının sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasına ve yönetilmesine bağlıdır (Alper, 2015). Tablo 1, Türkiye'nin su potansiyelini göstermektedir.

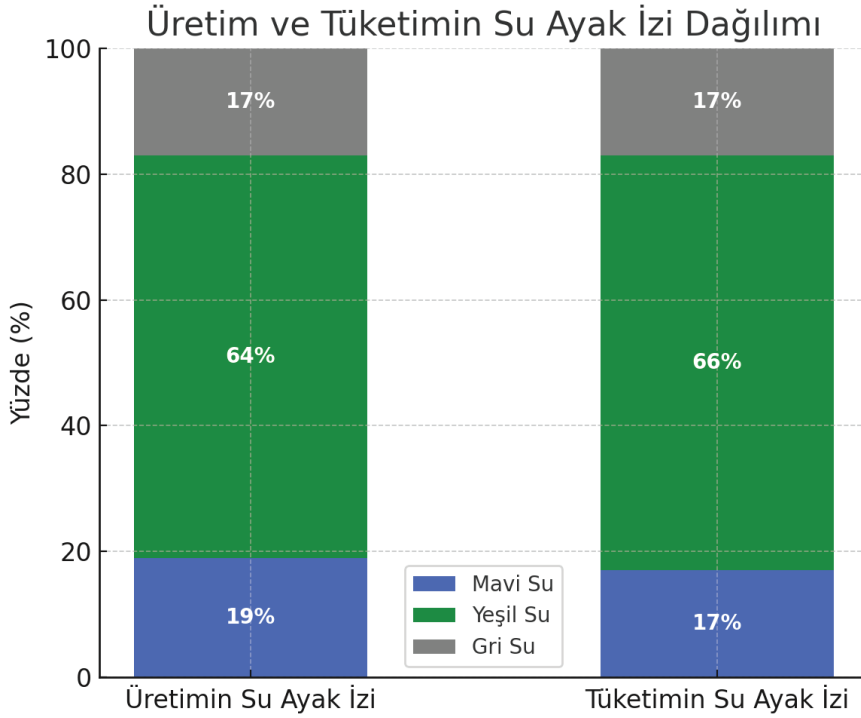
| <b>SU POTANSİYELİ</b>                        | <b>MİKTAR</b>                  |
|--|--------------------------------|
| <b>Yıllık ortalama yağış (mm/yıl)</b>        | 643 mm/yıl                     |
| <b>Buharlaşma (milyar m<sup>3</sup>/yıl)</b> | 274 milyar m <sup>3</sup> /yıl |
| <b>Yeraltına sızma m<sup>3</sup>/yıl</b>     | 41 milyar m <sup>3</sup> /yıl  |
| <b>Yüzey suyu akışı m<sup>3</sup>/yıl</b>    | 186 milyar m <sup>3</sup> /yıl |
| <b>Yıllık yağış miktarı</b>                  | 501 milyar m <sup>3</sup> /yıl |
| <b>Kullanılabilir yüzey suyu</b>             | 98 milyar m <sup>3</sup> /yıl  |
| <b>Yeraltı suyu çekilmesi</b>                | 14 milyar m <sup>3</sup> /yıl  |
| <b>Net kullanılabilir tatlı su kaynağı</b>   | 112 milyar m <sup>3</sup> /yıl |
| <b>Kişi başına düşen tatlı su miktarı</b>    | 1.519 m <sup>3</sup> /kişi/yıl |

Tablo 1. Türkiye'nin su potansiyeli

Kaynak: <https://www.wwf.org.tr/>. Trkiyeninsuayakiziraporu, 2720

Tablo, Türkiye'nin her yıl ortalama 643 milimetre yağış aldığını, yani yaklaşık 501 milyar m<sup>3</sup> suya sahip olduğunu göstermektedir. Ancak, sadece 186 milyar m<sup>3</sup> yüzey akışı ve 41 milyar m<sup>3</sup> yeraltı suyu sızıntısı olarak kullanılabilir durumdadır, bu da yağışların büyük bir kısmının (274 milyar m<sup>3</sup>) buharlaşma yoluyla kaybedildiği anlamına gelir. Kullanılabilir yüzey suyu 98 milyar m<sup>3</sup> ve yeraltı suyu potansiyeli 14 milyar m<sup>3</sup>'dür. Bu nedenle, yıllık net kullanılabilen tatlı su kaynağının 112 milyar m<sup>3</sup> olduğu tahmin edilmektedir. Bu miktarın Türkiye nüfusu arasında bölünmesi sonucunda kişi başına yaklaşık 1.519 m<sup>3</sup> su düşmektedir.

Şekil 3. Su ayak izi bileşenlerine göre Türkiye'nin üretim ve tüketim su ayak izleri



Kaynak: Pegram vd., (2014).

Üretim ve tüketim su ayak izlerinin dağılımı Şekil 3'te gösterilmektedir. Grafik, her iki kategorinin en büyük payının yağmur suyu ve toprakta doğal olarak tutulan suyu içeren yeşil sudan oluştuğunu göstermektedir. Yeraltı suyu ve yüzey suyu, tüketimin %17'sini ve üretimin %19'unu oluşturmaktadır. Her iki durumda da, arıtma gerektiren kirli su olan gri suyun yüzdesi %17 ile sabit kalmaktadır. Bu tablo, temiz tatlı suyun da yoğun olarak kullanıldığını, ancak endüstriyel ve tarımsal süreçlerde öncelikle doğal yağmur suyu kaynaklarının kullanıldığını göstermektedir.

Aşağıda, Türkiye'de gerçekleştirilen su ayak izi çalışmalarından bazıları yer almaktadır:

Alper (2015), yüksek lisans tezinde Türkiye'deki pamuk yetiştiriciliğinin su ayak izini incelemiştir. Adana, Antalya, Aydın, Diyarbakır, İzmir ve Şanlıurfa illeri için Cropwat programı kullanılarak su ayak izleri hesaplanmıştır. Bulgular, aşağıdaki illerin her biri için toplam su ayak izi değerinin belirlendiğini göstermiştir: Adana için 1631 m<sup>3</sup>/ton, Aydın için 2047 m<sup>3</sup>/ton, Antalya için 2339 m<sup>3</sup>/ton, İzmir için 2694 m<sup>3</sup>/ton, Şanlıurfa için 2716 m<sup>3</sup>/ton ve Diyarbakır için 3345 m<sup>3</sup>/ton. Raporlara göre, her şehir için mavi su ayak izi değeri, dünya genelinde olduğu gibi yeşil su ayak izi değerinden daha yüksekti. Raporlara göre, Adana hem mavi hem de yeşil su açısından en yüksek verime (5,13 ton/hektar) ve en düşük su kullanımına (1631 m<sup>3</sup>/ton) sahiptir. Yazara göre, Adana'da pamuk yetiştiriciliğinin yaygınlaştırılması su tasarrufu sağlayacaktır ve su politikası oluşturmak için diğer ürünler için de benzer araştırmalar yapılabilir.

Van ilinde yetiştirilen yonca, patates, şeker pancarı ve silajlık mısırın su ayak izi değerleri Yerli ve ark. (2019) tarafından belirlenmiştir. Çalışmada silajlık mısır için 147,4 m<sup>3</sup>/ton, patates için 230,3 m<sup>3</sup>/ton, şeker pancarı için 120,0 m<sup>3</sup>/ton ve yonca için 287,5 m<sup>3</sup>/ton su ayak izi değerleri belirlenmiştir. Buna göre, yeşil su kullanımı küresel ortalamanın altında olduğundan (Yerli vd., 2019), yağışların faydalarını en üst düzeye çıkarmak için ekim düzenlerini ve/veya ekim-hasat dönemini değiştirmek için araştırmalar yapılmalıdır.



Türkiye'deki pamuk üretiminin su ayak izini inceleyen bir tez için Şanlıurfa, Aydın, Hatay, Diyarbakır, Adana ve İzmir illerinde pamuk yetiştiriciliğinin su ayak izi hesaplanmıştır. 2016 ve 2018 yıllarında yapılan çalışmalarda, pamuk üretim sürecinde kullanılan toplam su ayak izi, yeşil su (yağmur suyu) ve mavi su (sulama suyu) hesaplanmıştır. Bu çalışma, ülkemizin pamuk yeşil su ihtiyacını karşılamak için gereken ortalama yağış miktarının 95 mm olduğunu belirlemiştir. Ülkemizde pamuk üretim sürecinde hektar başına ortalama su ayak izi 2016 yılında 17.746 m<sup>3</sup>/ha, 2018'de ise 16.059 m<sup>3</sup>/ha olmuştur. Pamuk üretiminin toplam yıllık su ayak izi 2016 yılında 3,3 milyar m<sup>3</sup> olmuştur, 2018'de 4,4 milyar m<sup>3</sup>'ye yükselmiştir. Mavi su ayak izi bileşeni, toplam yıllık su ayak izinin %96'sını oluştururken, yeşil su ayak izi bileşeni yaklaşık %4'ünü oluşturmaktadır. Engin (2019) göre, bir ton pamuk yetiştirmek için ortalama su ayak izi 2016 yılında 1.782 m<sup>3</sup>/ton gerçekleşmişken, 2018'de %14 artışla 2.029 m<sup>3</sup>/tona yükselmiştir.

Avanoz (2020), yüksek lisans tezinde Türk tarım ürünlerinin su ayak izini tahmin etmiştir. Çalışma, tüm Türk tarım ürünlerini ve 81 ili kapsamaktadır. Çalışmanın bulguları, Türkiye'nin toplam tarımsal su ayak izinin 106,85 milyar m<sup>3</sup> olduğunu göstermektedir. Buğday, 33,5 milyar m<sup>3</sup> ile en büyük su ayak izine sahiptir. Baharat grubundaki ürünler en düşük su ayak izi değerine sahiptir. Bu çalışmaya göre, Şanlıurfa ili en büyük mavi su ayak izine sahipken, Konya ili en yüksek toplam ve yeşil su ayak izine sahiptir. Avanoz (2020) göre, zeytinin su ayak izi 4,47 milyar m<sup>3</sup> olup, bunun 1,45 milyar m<sup>3</sup>'ü yeşil, 3,02 milyar m<sup>3</sup>'ü mavidir.

Pilevneli ve ark. (2023), iklim değişikliğinin tarımsal üretimi nasıl etkilediğini incelemek için su ayak izi yaklaşımını kullanmıştır. Türkiye'deki 25 nehir havzasını inceleyen çalışmada referans yıl olarak 2015 seçilmiştir. Raporlara göre, 2015–2040 yıllarında iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki en belirgin etkilerinin görüleceği tahmin edilmektedir. Çalışma, tarım ürünleri yıllık üretim, gelir ve mavi su ayak izi açısından derecelendirildiğinde, mısır ve buğdayın iklim değişikliği nedeniyle kuraklığa en duyarlı 12 öncelikli temel mahsul arasında olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, Ege bölgesinde hem toplam üretim hem de gelir düzeylerinin %100'e varan oranlarda düşebileceği belirtilmiştir (Pilevneli vd., 2023).

Türkiye'de yetiştirilen ayçiçeğinin su ayak izini belirleyen Bulut'un (2023) çalışması 2017-2021 yıllarını kapsamaktadır. Çalışmanın bulguları, Türkiye'deki ayçiçeklerinin su ayak izinin toplamı 3,460 milyar m<sup>3</sup> olduğunu, yeşil su ayak izinin 0,803 milyar m<sup>3</sup> ve mavi su ayak izinin 2,656 milyar m<sup>3</sup> olduğunu göstermektedir. Mavi su ayak izi rakamı küresel ortalama yüksek olmakla birlikte, Türkiye'deki ortalama su ayak izi 1.625 m<sup>3</sup>/ton olup, bu rakam küresel ortalama düşüküdür. Tekirdağ ili en yüksek su ayak izi değerine sahiptir. Bu durum, Tekirdağ'ın Türkiye'de ayçiçeği ekiminin en fazla olduğu il olmasıyla açıklanmaktadır. Karadeniz bölgesinin en büyük yeşil su ayak izine sahip olduğu tespit edilmiştir. Çalışmanın bulgularına göre, Karadeniz bölgesinde ayçiçeği üretimi artarsa, tarımsal üretimin mavi su ayak izi azalacaktır (Bulut, 2023).

2014 tarihli "Türkiye Su Ayak İzi Raporu"nda, üretim ve tüketim bunun yanında ihracat ve ithalat su ayak izi de hesaplamaya dahil edilmiştir. Rapora göre, Türkiye bazı malları ithal etmekte, su yoğun ürünleri ihraç etmekte ve mevcut su kaynaklarına bağımlıdır. Su stresi yaşayan havzalarda yüksek su ayak izi ciddi riskler (içme suyu kıtlığı, yüzey sularının kuruması, türlerin yok olması) oluşturabilirken, su zengini havzalarda bu etki daha sınırlı olacaktır. Rapor ayrıca havzaların çok yönlü incelenmesi gerektiğini vurgulamıştır (Kutlu, 2022).

## Sonuç

Günümüzde özel sektör, sürdürülebilirliği değerlendirmek için en yaygın kullanılan ölçütlerden biri olan su ayak izini çoğunlukla işletmeleri, ürünleri veya ticari malları incelemek için kullanmaktadır (Pegram vd., 2014).

Gıda tüketimi ve su kaynaklarının kullanımı, su ayak izi aracılığıyla birbirine bağlıdır. Gıda tüketimi, genellikle bir kişinin toplam SAI'sinin en büyük bölümünü oluşturur ve evsel su kullanımından önemli ölçüde daha fazladır (Jalava vd., 2014).

Türkiye, coğrafi konumu nedeniyle suyla çevrili olduğu izlenimini verse de, su açısından zengin bir ülke değildir. Türkiye Sanayici ve İşadamları Bankası'na (2018) göre, mevcut eğilimler devam ederse Türkiye'nin 2030 yılına kadar su fakiri bir ülke haline gelmesi öngörülmektedir. Raporlara göre, Türkiye'deki yüzey suyu seviyelerinin 2030 yılına kadar %20, 2050 yılına kadar %35 ve 2100 yılına kadar %50 düşmesi öngörülmektedir. İnsanların beslenme tercihlerinin, kontrolsüz nüfus artışına ek olarak su ayak izlerini artırdığı söylenmektedir (Ermumcu ve ark. 2022). Sonuç olarak, sürdürülebilir su kullanımının bir ölçüsü olan su ayak izi kavramı ve Türkiye ile ilgili değerlendirmesi büyük önem taşımaktadır. Türkiye'de üretilen tüm ürünler için gerekli olan mavi, yeşil ve gri su miktarı, “üretim su ayak izi” olarak bilinir. Ülkeden ihraç edilen mal veya hizmetlerin üretiminde kullanılan mavi, yeşil ve gri su miktarı “ihracatın su ayak izi” olarak bilinir. Ülkeye ithal edilen mal veya hizmetlerin üretiminde kullanılan mavi, yeşil ve gri su miktarı “ithalatın su ayak izi” olarak bilinir. Yurt içinde tüketilen mal veya hizmetlerin üretiminde kullanılan mavi, yeşil ve gri su miktarı “tüketim su ayak izi” olarak bilinir (Pegram vd., 2014).

Su ayak izi değerlendirme çalışmaları, atık su yönetimi ve su kullanımını dengelemenin tek yoludur. Uzun üretim zinciri ve veri eksikliği nedeniyle, süreç düzeyinde su ayak izini tahmin etmek, özellikle en fazla su kullanan tekstil endüstrisi için küresel bir sorun haline gelmiştir (Li vd., 2021: 519).

Endüstriyel faaliyetlerin artması, bölgesel su kıtlığı ve atık su kirliliğine yol açmıştır ve bu sorunlar artık ülkemizin yanı sıra dünyadaki tüm diğer ülkeler için de sorun teşkil etmektedir. Aşırı su kullanımı ve kirlilik sorunları, tekstil ve hazır giyim endüstrilerinde üretim payı açısından üst sıralarda yer alan Çin tarafından çözülmemiştir. Öztürk'e (2005) göre, Çin Türkiye'nin tekstil endüstrisinin önemli bir tedarikçisidir. Bu ülkelerde gerçekleştirilen araştırmalara göre, sorunun çözülebilmesi için üretilen atık su miktarı ile kullanılan tatlı su kaynakları miktarı arasında denge sağlamak gerekmektedir. Su ayak izi değerlendirme çalışmaları, bu dengeyi sağlamanın tek yoludur. Uzun üretim zinciri ve veri eksikliği sebebiyle, süreç düzeyinde su ayak izini ölçmek, özellikle su kullanımının en yüksek olduğu tekstil endüstrileri için küresel bir sorun haline gelmiştir. Şirketlerin çevresel etkilerini değerlendirmek için çok sayıda çalışma yürütülmekte ve sürdürülebilir bir üretim sağlayabilmek adına bu sorunların bertaraf edilebilmesi için çeşitli araştırmalar sürdürülmektedir (Li X. vd., 2021).

Su ayak izi değerlendirmeleri, üretim faaliyetlerinin çevreyi nasıl etkilediğini anlamamıza ve sürdürülebilirlik için en iyi kararları almamıza yardımcı olmaktadır. Bu bakış açısı ile sürdürülebilir üretim dikkate alındığında maliyet ve zaman etkinliği, ürün ve süreç kalitesi, doğal hammadde ve enerji kaynakları kullanımı konularındaki üretim faaliyetlerinin sürekli iyileştirilmesi gerekmektedir (Mercan, 2022: 130). Ayrıca kurumlarda sosyal sorumluluk gereği; çevre kirliliğinin azaltılması, bitki örtüsünün korunması sağlanmakta, kültürel varlıkların korunması, daha temiz üretim süreçleri, enerji tasarrufu sağlanır, geri dönüşüm oluşturularak eko verimlilik de sağlanmaktadır (Aktan ve Börü, 2007; Yılmaz, 2018). Özellikle su yoğun endüstrilerde hem kaynak verimliliğini hem de ekosistem

korumasını sağlar. Sonuç olarak, sürdürülebilir üretim uygulamalarının merkezinde olması gereken önemli bir araç su ayak izidir. İklim değişikliği senaryoları da göz önüne alındığında, ürün modellerini yeniden düşünmek ve su kaynaklarını sürdürülebilir bir şekilde yönetmek kaçınılmazdır. Türkiye'nin gelecekteki su güvenliği için, su ayak izi değerlendirmelerinin politika oluşturma sürecinde temel bir araç olarak kullanılması çok önemlidir.

## KAYNAKÇA

- Aktan, C. C. ve Börü, D. (2007). Kurumsal sosyal sorumluluk, İşletmeler ve Sosyal sorumluluk, İstanbul: İgiad Yayınları.
- Alper, F. (2015). Sürdürülebilirlik kavramı içerisinde su ayak izi: Tekstil sektörü örneği (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Avanoz, Z. (2020). Türkiye’de tarımsal üretimin su ayak izinin hesaplanması (Yüksek lisans tezi). Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman.
- Avcioğlu, A. (2020). Üzüm suyu konsantresi üretiminde yaşam döngüsü değerlendirmesi (Yüksek lisans tezi). Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Badem, M., & Hurma, H. (2025). Evaluation of the Profitability and Competitiveness of Strategic Products with the Policy Analysis Matrix: The Case of Tekirdağ, Türkiye. *Sustainability*, 17(11), 5112. <https://doi.org/10.3390/su17115112>
- Bulut, A. P. (2023). Determining the water footprint of sunflower in Turkey and creating digital maps for sustainable agricultural water management. *Environment, Development and Sustainability*, 25, 11999–12010.
- Bulut, S., ve Şahin, G. (2020). Pedagojik formasyon öğrencilerinin su tüketim davranışları ile su ayak izlerinin incelenmesi. *Akdeniz Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 3(2), 53–70.
- Cansaran, D. (2014). Çevre bilinci düzeyini belirlemeye yönelik uygulamalı bir çalışma: Merzifon Meslek Yüksekokulu örneği. *Aksaray Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 7(1), 69- 74.
- Cansaran, D. (2019). Sürdürülebilir kentler için çevre bilinci. Baskı, Ankara: Gece Akademi.
- Chapagain, A. K., ve Abraham, M. A. (2017). Water footprint: State of the art: What, why, and how? In *Encyclopedia of Sustainable Technologies* (Vol. 4, pp. 153–163). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10164-2>
- Chapagain, A. K., Hoekstra, A. Y., Savenije, H. H. G., ve Gautam, R. (2006). The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. *Ecological Economics*, 60(1), 186–203.
- Dang, Y., Qin, L., Huang, L., Wang, J., Li, B., ve He, H. (2022). Water footprint of rainfed maize in different growth stages and associated climatic driving forces in Northeast China. *Agricultural Water Management*, 263, 107463. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107463>
- Dumont, A., Salmoral, G., ve Llamas, M. R. (2013). The water footprint of a river basin with a special focus on groundwater: The case of Guadalquivir basin (Spain). *Water Resources and Industry*, 1, 60–76.
- Engin, S. (2019). Türkiye’de pamuk üretiminin su ayak izi (Yüksek lisans tezi). Ankara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara.
- Ercin, A. E., ve Hoekstra, A. Y. (2014). Water footprint scenarios for 2050: A global analysis. *Environment International*, 64, 71–82.

- Ermumcu, K. M. Ş., Çıtar Dazıroğlu, M. E., Erdoğan Gövez, N., ve Acar Tek, N. (2022). Evaluation of personal water footprint components in Turkey: Factors associated with obesity and food consumption. *International Journal of Environmental Health Research*, 34(1), 432–442. <https://doi.org/10.1080/09603123.2022.2153806>
- Feng, B., Zhuo, L., Xie, D., Mao, Y., Gao, J., Xie, P., ve Wu, P. (2021). A quantitative review of water footprint accounting and simulation for crop production based on publications during 2002–2018. *Ecological Indicators*, 120, 106962. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106962>
- Fereres, E., Villalobos, F. J., Orgaz, F., Minguez, M. I., Van Halsema, G., ve Perry, C. J. (2017). On the water footprint as an indicator of water use in food production. *Irrigation Science*, 35(2), 83–85.
- Fulton, J., Cooley, H., ve Gleick, P. H. (2012). *California's water footprint*. Oakland, CA: The Pacific Institute.
- Ge, L., ve Xie, G., ve Li, S. (2016). The analysis of water footprint of production and water stress in China. *Journal of Resources and Ecology*, 7(5), 334–340.
- Hoekstra, A. Y. (2014). Sustainable, efficient, and equitable water use: The three pillars under wise freshwater allocation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 1(1), 31–40.
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., ve Mekonnen, M. M. (2011). *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*. London: Earthscan.
- Hogeboom, R. J. (2020). The water footprint concept and water's grand environmental challenges. *One Earth*, 2(3), 218–222.
- Hogeboom, R. J., Knook, L., ve Hoekstra, A. Y. (2018). The blue water footprint of the world's artificial reservoirs for hydroelectricity, irrigation, residential and industrial water supply, flood protection, fishing and recreation. *Advances in Water Resources*, 113, 285–294. <https://www.wwf.org.tr/?2720/trkiyeninsuayakiziraporu>>, Erişim Tarihi:04.10.2025.
- Kutlu, T. (2022). *Ankara'nın kentsel atık sularının gri su ayak izi (Yüksek lisans tezi)*. Ankara Üniversitesi, Ankara.
- Li, X., Ren, J., Wu, Z., Wu, X., ve Ding, X. (2021). Development of a novel process-level water footprint assessment for textile production based on modularity. *Journal of Cleaner Production*, 291, 125884. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125884>
- Lovarelli, D., Bacenetti, J., ve Fiala, M. (2016). Water footprint of crop productions: A review. *Science of the Total Environment*, 548–549, 236–251.
- Masud, M. B., McAllister, T., Cordeiro, M. R. C., ve Faramarzi, M. (2018). Modeling future water footprint of barley production in Alberta, Canada: Implications for water use and yields to 2064. *Science of the Total Environment*, 630, 1512–1524.
- Matušík, J., ve Kočí, V. (2021). What is a footprint? A conceptual analysis of environmental footprint indicators. *Journal of Cleaner Production*, 285, 124833. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124833>

- Mekonnen, M. M., ve Gerbens-Leenes, W. (2020). The water footprint of global food production. *Water*, 12(10), 2696.
- Mekonnen, M. M., ve Hoekstra, A. Y. (2010). A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(7), 1259–1276. <https://doi.org/10.5194/hess-14-1259-2010>
- Mercan, T. (2025). Sosyal Bilimlerde Bilimsel ve Uygulamaları Çalışmalar, Ed: Ravanoğlu, G.A. ve Çoker, E. içinde “Üretim Süreçlerinde Sürdürülebilirlik ve Otonom Robot Teknolojisi”, Duvar Yayınevi.
- Mercan, Y. (2022). Tedarik Zinciri Yönetiminde Sürdürülebilirlik ve Teknoloji, Ed: Çetin, O., içinde “Endüstri 4.0’ın Sürdürülebilir Üretimdeki Rolü”, Paradigma Yayınevi.
- Mercan, Y. ve Çetin, O. (2022). Sosyal ve Beşerî Bilimlerde Teori ve Araştırmalar, Ed: Ceylan, A. Ç., İyit, N. ve Akyıldız, Y. içinde “Çevresel Eğilimlerin Tedarik Zincirine Etkisi”, Serüven Yayınevi.
- Morillo, J. G., Díaz, J. A. R., Camacho, E., ve Montesinos, E. (2015). Linking water footprint accounting with irrigation management in high value crops. *Journal of Cleaner Production*, 87, 594–602.
- Muratoğlu, A. (2018). Dicle Havzasının su ayak izinin hesaplanması. 1. Uluslararası İçme Suyu ve Atık Suyu Sempozyumu, 1–9. Afyon.
- Muratoğlu, A. (2020). Üretimin su ayak izinin incelenmesi: Diyarbakır ili için bir vaka çalışması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(2), 845–858.
- Öztaş Karlı, R. G., ve Artar, M. (2021). Kentsel su yönetiminde araç olarak su ayak izi ve mavi-yeşil altyapı. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 58(1), 145–162. <https://doi.org/10.20289/zfdergi.851375>
- Öztürk, K. (2005). Energy usage and cost in textile industry: A case study for Turkey. *Energy*, 30(13), 2424–2446. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.11.014>
- Pegram, G., Conyngham, S., Aksoy, A., Dıvrak, B. B., ve Öztok, D. (2014). Türkiye'nin su ayak izi raporu: Su, üretim ve uluslararası ticaret ilişkisi. İstanbul: WWF-Türkiye.
- Pilevneli, T., Capar, G., ve Sánchez-Cerdà, C. (2023). Investigation of climate change impacts on agricultural production in Turkey using volumetric water footprint approach. *Sustainable Production and Consumption*, 35, 605–623.
- Ricardo, L. V., Andre, M. N., Bruno, T. L. X., Mikaela, L. P. B., ve Paulo, S. S. (2019). Assessment of the gray water footprint of the pesticide mixture in a soil cultivated with sugarcane in the northern area of the state of Pernambuco, Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 234, 925–932.
- Sandu, M. A., ve Virsta, A. (2021). The water footprint in context of circular economy. *AgroLife Scientific Journal*, 10(2), 170–177.
- Scanlon, B. R., Fakhreddine, S., Rateb, A., Graaf, I., Famiglietti, J., Gleeson, T., Grafton, R. Q., Jobbagy, E., Kebede, S., Kolusu, S. R., Konikow, L. F., Long, D., Mekonnen, M., Schmied, H. M., Mukherjee, A., MacDonald, A., Reedy, R. C., Shamsudda, M., Simmons, C. T., Sun, A.,

Taylor, R. G., Villholth, K. G., Vörösmarty, C. J., ve Zheng, C. (2023). Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future. *Nature Reviews Earth ve Environment*, 4, 87–101. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00378-6>

Şenocak, K., Eser, L. Y., ve Genç, M. C. (2022). Maliye yazıları teori – iktisat– politika (Ed. Arkan Yusufoglu ve Muharrem Çakır). Ankara: Gazi Kitabevi.

Türkiye Sınai Kalkınma Bankası. (2018, Mart 21). Sürdürülebilir kalkınma. <http://cevreciyiz.com/makale-detay/1251/su-ayak-izi-nedir>

Türkiye'nin Su Ayak İzi Raporu. (2014). Su, üretim ve uluslararası ticaret ilişkisi. WWF-Türkiye. <https://www.wwf.org.tr/?2720/trkiyeninsuayakiziraporu>

Veetil, A. V., ve Mishra, A. K. (2016). SWAT water security assessment using blue and green water footprint concepts. *Journal of Hydrology*, 542, 589–602. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.09.032>

Water Footprint Network. (2012). Water footprint network. <https://waterfootprint.org>

Yerli, C., Şahin, Ü., Kızıloğlu, F. M., Tüfenkçi, Ş., ve Örs, S. (2019). Van ilinde silajlık mısır, patates, şeker pancarı ve yoncanın su ayak izi. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 29(2), 195–203.

Yılmaz, F. (2018). Corporate social responsibility. In K. Özdaşlı, et al. (Eds.), *Innovative Approaches in Social, Human and Administrative Science*, Ankara: Gece Akademi.

Yılmaz, F. (2020). Dijital insan kaynakları yönetimi. In H. T. Uysal, C. Aksoy, ve F. Yılmaz (Eds.), *Dijital Yönetim içinde* (s. 381-404). Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.

Zhuo, L., Mekonnen, M. M., Hoekstra, A. Y., ve Wada, Y. (2016). Inter- and intra-annual variation of water footprint of crops and blue water scarcity in the Yellow River Basin (1961–2009). *Advances in Water Resources*, 87, 29–41. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.11.002>





# Bölüm 4

## BOYARMADDE GİDERİMİNDE MİKROBİYAL ENZİMLER: BİYOKATALİTİK MEKANİZMALAR VE SÜRDÜRÜLEBİLİR STRATEJİLER

*Sevil ÇALIŞKAN ELEREN<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği  
Bölümü, 16059, Görükle, Nilüfer-BURSA, <https://orcid.org/0000-0002-8489-9214>

## 1. GİRİŞ

Hızla genişleyen endüstriyel üretim hacmi ve ürün çeşitliliği, beraberinde biyolojik olarak parçalanması güç ve yüksek hacimli organik kirleticileri barındıran atık suların oluşumuna neden olmaktadır. Bu tür atık sular, deşarj edildikleri alıcı ortamlar için ciddi bir çevresel tehdit oluşturarak ekolojik dengeyi bozma potansiyeline sahiptir. Ekosistemi korumak ve uluslararası çevresel standartları karşılamak adına, söz konusu kirleticilerin deşarj öncesinde yüksek verimlilikle arıtılması kritik bir gerekliliktir.

Kirleticilerin yapısal kararlılığı, düşük çözünürlüğü ve yüksek toksisite seviyeleri, bu bileşenlerin fiziksel, kimyasal ve biyolojik bozunma süreçlerine karşı direnç göstermesine neden olmaktadır. Bu tür dirençli bileşenlerin arıtımında oksitleyici maddeler, elektrokimyasal prosesler, adsorpsiyon, iyon değişimi ve membran filtrasyonu gibi çeşitli fiziksel ve kimyasal yöntemlerden yararlanılmaktadır (Ufarté, Laville, Duquesne, ve Potocki-Veronese, 2015). Ancak bu teknikler; yüksek işletme maliyetleri, toksik yan ürün oluşumu ve düşük giderim verimliliği gibi önemli dezavantajlara sahiptir. Bu kısıtlamalar nedeniyle, son yıllarda uygulama kolaylığı sağlayan, ekonomik ve çevre dostu biyoteknolojik yaklaşımların geliştirilmesi stratejik bir önem kazanmıştır. Bu alternatifler arasında mikrobiyal enzim temelli arıtma yöntemleri, dirençli ve toksik organik kirleticilerin mineralizasyonunda umut verici bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Geleneksel yöntemlere kıyasla daha sürdürülebilir olan bu biyolojik bozunma yaklaşımı; farklı mikrobiyal türlerin veya bunlardan elde edilen protein, enzim ve gen gibi aktif biyolojik ürünlerin kullanımıyla tehlikeli maddeleri ekosistemden uzaklaştırmaktadır. Özellikle bakteriyel ve fungal enzimler, katalitik reaksiyon mekanizmaları aracılığıyla karmaşık kirleticileri daha az toksik ürünlere dönüştürebilme yeteneğine sahiptir. Bu süreçler, daha düşük enerji gereksinimiyle gerçekleştirilmesi sayesinde çevre dostu ve popüler bir yöntem olarak modern arıtma teknolojileri arasındaki yerini almaktadır.

Atık su arıtımında mikrobiyal enzimlerin biyokatalitik potansiyelinin değerlendirilmesi, sadece su kaynaklarının ekotoksikolojik yükünü hafifletmekle kalmayıp, aynı zamanda endüstriyel deşarj kalitesini bilimsel standartlar çerçevesinde iyileştirmektedir. Geleneksel arıtma yöntemlerinin aksine, düşük enerji tüketimi ve minimize edilmiş kimyasal girdi kullanımı üzerine kurulu olan bu teknoloji, kaynak verimliliğini esas alan döngüsel ekonomi modelini güçlendirmektedir.

Bu bölüm, endüstriyel atıksu arıtımında sürdürülebilir, düşük maliyetli, daha az toksik yan ürün oluşturan, daha az enerji kullanan ve yüksek detoksifikasyon potansiyeline sahip mikrobiyal enzim temelli arıtmanın önemini vurgulamaktadır. Mikrobiyal enzim türleri, arıtmadaki rolü, mikrobiyal enzim sistemlerinin etkinliğini ve verimliliğini artırmayı amaçlayan yeni metodolojileri incelemektedir.

## 2. MİKROBİYAL ENZİMLERİN TEMELLERİ VE ARITMADAKİ ROLÜ

Çok sayıda ve çeşitte dirençli kirletici içeren endüstriyel atıksuların arıtımı için çeşitli biyolojik, fizikokimyasal ve hibrit teknikler kullanılmaktadır. Son yıllarda mikrobiyal biyoremediasyon, enzimatik bozunma ve nanoteknoloji destekli sistemler ön plana çıkmaktadır (Ilyas ve Batoool, 2025). Enzimatik atık su arıtımı, öncelikle hayvanlardan, bitkilerden, mikroorganizmalardan, organik atıklardan ve sentetik kaynaklardan elde edilen enzimlere dayanır ve her biri farklı avantajlar ve sınırlamalar sunar (Feng vd., 2025).

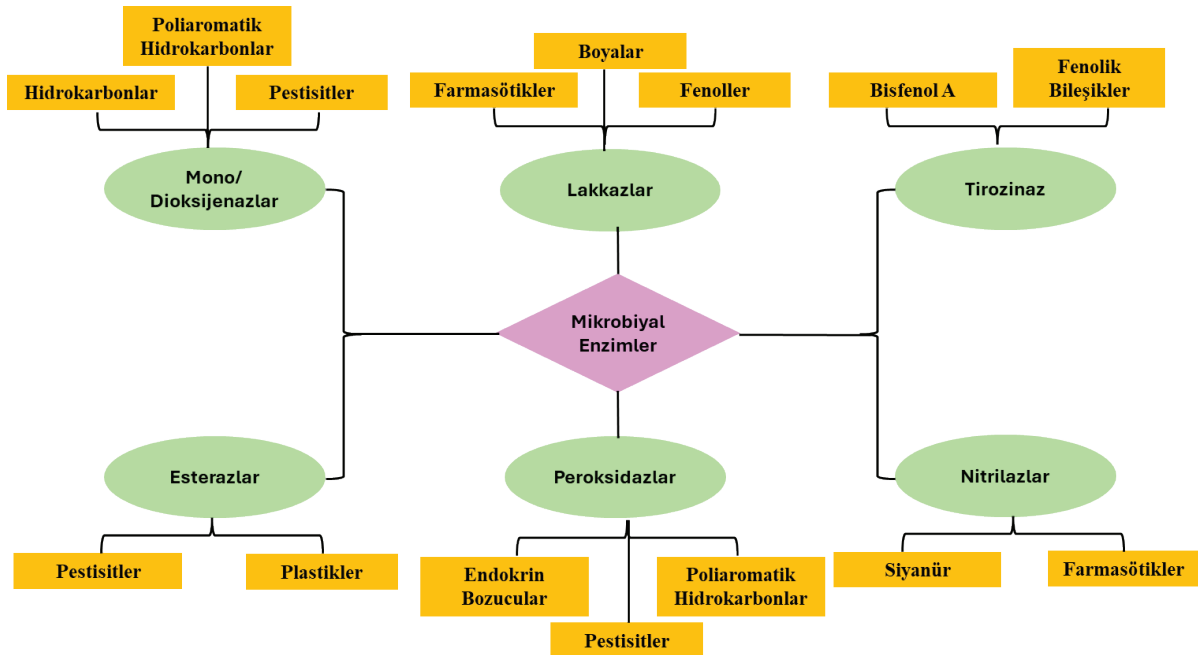
Enzimler, amino asitlerden oluşan proteinlerdir (Eid ve Ibrahim, 2021). Reaksiyonları yüksek özgülük ve verimlilikle katalize edip hızlandırabilen biyolojik makromoleküllerdir ve bu da onları

çok sayıda endüstriyel uygulamada vazgeçilmez kılar (Eid ve Ibrahim, 2021; Khan, 2025). Mikrobiyal enzimler, ölçeklenebilirlikleri, uygun maliyetli olmaları ve sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu olmaları nedeniyle üstün biyokatalizörler olarak kabul edilmektedir (Mazotto, de Ramos Silva, de Brito, Rocha, ve de Souza Soares,, 2021). Bu özgülükleri sayesinde enzimler, çevre kirliliğine neden olan çeşitli ve dirençli organik kirleticileri (örneğin, sentetik boyalar, pestisitler, deterjanlar, kozmetikler, plastikler, poliaromatik hidrokarbonlar (PAH)' lar ve farmasötikler) hedef alarak (Khan, 2025; Singh, Singh, ve Pandey, 2019), onları daha zararsız ürünlere dönüştürür veya tamamen parçalanmasını sağlar.

Mikroorganizmalar, ticari enzim üretimi için yaygın olarak kullanılan enzim kaynaklarıdır. Mikroorganizmaların; kültürlenmelerinin kolay oluşu ve hızlı büyümeleri sayesinde sağlanan yüksek verim, çeşitli tür/işlevsel çeşitlilik ve basit hücre yapıları sayesinde hayvanlara ve bitkilere kıyasla kolayca seçilip değiştirilebilmeleri, atıksudaki farklı bileşikleri parçalamak için çeşitli enzimler üretebilmeleri gibi çeşitli avantajları vardır (Feng vd., 2025).

Bakteriler, mantarlar ve mikroalgler enzim kaynağı olarak kullanılabilir olsada, farklı mikroorganizmalardan üretilen aynı enzim türü farklı performanslara sahiptir (Kumar, Abhinav, Singh, Panwar, ve Manna, 2025). Bu nedenle, endüstriyel uygulamalar için uygun mikroorganizmaları ve enzimleri belirlemek gerekir (Khan, 2025; Feng vd., 2025). Çeşitli bakteri, mantar, alg ve bitki türlerinden elde edilen monooksijenazlar veya dioksijenazlar, halojenazlar, peroksidazlar, fosfotriesterazlar, hidrolazlar, transferazlar ve oksidoredüktazlar gibi farklı enzimler, kirleticilerin gideriminde kullanılmaktadır (Mousavi vd., 2021) (Şekil 1).

Pestisitlerin gideriminde, mono/dioksijenaz, esteraz ve peroksidazlar daha etkilidir. Fenolik bileşiklerin gideriminde, lakkazlar ve tirozinazlar; farmasötiklerin gideriminde, lakkazlar ve nitrilazlar daha etkilidir. PAH'lar ise daha çok mono/dioksijenaz ve peroksidazlar tarafından daha etkili bir şekilde giderilir (Kumar vd., 2025). Bakteriler, mantarlar ve mayalar da dahil olmak üzere seçilmiş mikroorganizmalar, ticari uygulamalar için çeşitli enzimlerin ekonomik olarak biyosentezi için kullanılmaktadır (Nigam, 2013).



Şekil 1. Çeşitli mikrobiyal enzimler ve hedef kirleticileri (Kumar vd., 2025)

**Mikrobiyal Oksijenazlar:** Oksijenazlar, oksidoredüktaz kategorisine aittir ve FAD/NADH/NADPH'yi co-substrat olarak kullanarak, moleküler oksijenden ( $O_2$ ) oksijen transfer ederek indirgenmiş substratların oksidasyonuna katılır (Hafez, 2021). Organik bileşiklerin metabolizmasında, reaktivitelerini veya suda çözünürlüklerini artırarak veya aromatik halkanın parçalanmasını sağlayarak önemli bir rol oynarlar. Oksijenazlar, klorlu alifatikler de dahil olmak üzere çok çeşitli bileşiklere karşı etkilidirler. Genellikle oksijenaz tarafından organik moleküle  $O_2$  atomlarının sokulması, aromatik halkaların parçalanmasına neden olur (Karigar ve Rao, 2011). Halojenli organik bileşikler, mikroorganizmaların oksijenaz grubu için önemli bir substrat kaynağıdır (Shome, 2020). Oksijenazlar ayrıca çok işlevli enzimlerle birlikte halojenli metanların, etanların ve etilenlerin dehalojenasyon reaksiyonlarına aracılık eder (Fetzner ve Lingens, 1994). Oksijenazlar, reaktanın oksijenlenmesi için kullandığı oksijen sayısına göre monooksijenazlar ve dioksijenazlar olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Monooksijenazlar, alkanlardan steroidler ve yağ asitleri gibi karmaşık endojen moleküllere kadar değişen substratların oksidatif reaksiyonlarını katalize eden çok yönlü bir enzim ailesini oluşturur. Çeşitli aromatik ve alifatik bileşiklerin kükürtten arındırılması, halojenden arındırılması, denitrifikasyonu, amonyaklaştırma, hidroksilasyonu, biyotransformasyonu ve biyobozunması monooksijenazlar tarafından katalize edilir. Oksijen açısından zengin koşullar altında, mono-oksijenaz oksidatif dehalojenasyon reaksiyonlarını katalize ederken, düşük oksijen seviyelerinde indirgeyici deklorinasyon gerçekleşir (Karigar ve Rao, 2011) Dioksijenazlar, esas olarak aromatik bileşikleri okside eder ve bu nedenle arıtmada kullanılır. Toprak bakterilerinde bulunurlar ve aromatik öncüllerin alifatik ürünlere dönüşümünde rol oynarlar (Hafez, 2021; Karigar ve Rao, 2011).

**Lakkazlar:** Lakkaz enzimleri (p-difenol: dioksijen oksidoredüktaz) geniş substrat özgünlüğü olan, moleküler oksijenin suya indirgenmesi suretiyle çeşitli fenoller, anilinler ve aromatik tiyoller gibi substratların oksidasyonunu katalizleyen ve serbest radikallerin oluşmasını sağlayan bakır içerikli polifenol oksidazlardır (Gianfreda, Xu, ve Bollag, 1999; Camarero, Ibarra, Martínez, ve Martínez., 2005; Sharma, Jain, Jain, Kidwai, ve Kuhad, 2018; Cañas ve Camarero, 2010). Birçok mikroorganizma, orto ve paradifenollerin, aminofenollerin, polifenollerin, poliaminlerin, ligninlerin ve aril diaminlerin yanı sıra bazı inorganik iyonların oksidasyonunu katalize edebilen hücre içi ve hücre dışı lakkazlar üretir (Mai, Schormann, Milstein, ve Huttermann, 2000; Ullah, Bedford, ve Evans, 2000; Rodríguez Couto ve Toca Herrera, 2006; Karigar ve Rao, 2011) Lakkaz, PAH'ları daha az toksik olan kinin formuna ve  $CO_2$ ' e dönüştürebilir (Mousavi vd.,2021). Lakkaz, fenolik bileşikler (orto ve paradifenol), aromatik aminler vb. bileşikler üzerinde oksitleyici bir etkiye sahiptir. Kalıcı kirleticilerin gideriminde etkilidir. Bu yeteneği sayesinde lakkaz, hem yeraltı sularında hem de sedimentteki kirliliğin kontrolüne de yardımcı olur (Gianfreda vd., 1999; Bhandari vd., 2021).

**Mikrobiyal Peroksidazlar:** Peroksidazlar, serbest radikal mekanizmasıyla oksidasyon-indirgeme reaksiyonunu katalizleyen ve çeşitli bileşikleri oksitlenmiş veya polimerize ürünlere dönüştüren enzimlerdir. Peroksidaz, bakteriler ve mantarlar tarafından üretilebilir. Bununla birlikte, mantarlardan elde edilen peroksidazların lignin dönüşümünde daha verimli olduğu düşünülmektedir (Albuquerque, Rocha, ve Valderez, 2019). Peroksidazlar, kaynaklarına ve aktivitelerine göre birçok türe ayrılmıştır. Doğadaki toksik maddeleri parçalama potansiyellerinin yüksek olması nedeniyle, lignin peroksidaz (LiP), mangan bağımlı peroksidaz (MnP) ve çok yönlü peroksidaz (VP) en çok incelenenlerdir. Lignin peroksidazlar, esas olarak beyaz çürükçül mantarlar tarafından salgılanan proteinlerdir. Lignini ve diğer fenolik bileşikleri parçalar (Karigar ve Rao, 2011). MnP enzimi, çoğu beyaz çürükçül mantarlar ve bazı bakterilerden elde edilir (Kumar ve Arora, 2022). Çok aşamalı bir reaksiyon ile  $Mn^{+2}$ 'yi  $Mn^{+3}$ 'e oksitleyerek çok çeşitli fenolik ve fenolik olmayan substratları oksitleyebilirler. MnP'ler, lignin giderimi (Hafez, 2021), atıksu arıtımı, biyoyakıt üretimi, boya

giderimi, biyoselüloz üretimi, biyoağartma ve meyve suyu özütü berraklaştırma dahil olmak üzere çok çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir (Kumar ve Arora, 2022). Mikrobiyal çok yönlü peroksidazlar (VP), diğer peroksidazların substratlarını, örneğin  $Mn^{+2}$ , veratril alkol ve fenolik olmayan bileşikler oksitleme yeteneğine sahiptir (Karigar ve Rao, 2011). VP'ler, geniş bir substrat yelpazesine sahip olmaları nedeniyle biyoteknolojik kullanım açısından özellikle ilgi çekicidir. VP'ler, fenolik ve fenolik olmayan bileşikler, pestisitler, yüksek redoks potansiyeline sahip boyalar, polisiklik aromatik hidrokarbonlar ve lignin dahil olmak üzere çok çeşitli maddeleri oksitleyerek hidrojen peroksiti indirger (Barber-Zucker, Mindel, Garcia-Ruiz, Weinstein, Alcalde, ve Fleishman, 2022)

**Esterazlar:** Mikrobiyal esterazlar, kısa zincirli yağ asidi esterlerinden karmaşık polimerik esterlere kadar çeşitli substratlardaki ester bağlarını hidrolize edebilen çok yönlü biyokatalizörlerdir. Bu enzimler ağırlıklı olarak bakteri, mantar ve algler tarafından üretilir. Esterazlar, endüstriyel ve biyoteknolojik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Mikrobiyal esterazlar, sentetik plastikler ve organofosfor bileşikler de dahil olmak üzere kalıcı çevresel kirleticilerin parçalanmasında çok önemli bir rol oynar (Mussakhmetov ve Silayev, 2025).

**Nitrilazlar:** Nitrilaz enzimleri (nitrilazlar), nitril bileşiklerinin karboksilik asit ve amonyağa hidrolizini katalize eder. Nitrilazlar, bitkiler, bakteriler ve mantarlar da dahil olmak üzere çok çeşitli organizmalar tarafından üretilir. Endüstriyel açıdan önemli karboksilik asitlerin sentezi ve siyanür ve toksik nitrillerin biyolojik arıtılması da dahil olmak üzere geniş endüstriyel ve biyoteknolojik uygulamalara sahiptir (Howden ve Preston, 2009; Thuku, Brady, Benedik, ve Sewell, 2008).

**Tirozinaz:** Tirozinaz, doğal bir enzim olup genellikle düşük derecede saflaştırılır ve esas olarak monofenollerin o-hidroksilasyonuna, karşılık gelen o- difenollere ve o-difenollerin moleküler oksijen kullanılarak o-kinonlara oksidasyonunu katalize eden çeşitli işlevlerde rol oynar. Fenol içeren atık suların ve kirlenmiş toprakların detoksifikasyonunda, ayrıca ilaç, kozmetik ve gıda endüstrilerinde önemli bir katalitik enzim olarak kullanılır (Zaidi, Ali, Ali, ve Naaz, 2014).

### 3. BOYARMADDE GİDERİMİNDE KİLİT OKSİDOREDÜKTAZLAR

Sentetik boyarmaddeler, başta tekstil endüstrisi olmak üzere birçok endüstri (kağıt, plastik, gıda, ilaç, kozmetik vb.) alanında yoğun bir biçimde kullanılmaktadır. Yıllık 90 milyon ton su tüketimiyle endüstriyel su kirliliğinin yaklaşık %20'sinden sorumlu olan tekstil ve deri sektörleri, her yıl ekosisteme 84.000 tona varan miktarda boyarmadde deşarj etmektedir (Routoula ve Patwardhan, 2020). Bu endüstrilerden çıkan atıksuların su ekosistemine doğrudan veya yeterince arıtılmadan deşarjı ile boyarmaddeler, güneş ışığının nüfuzunu azaltmakta ve böylece fotosentetik aktiviteyi, çözülmüş oksijen konsantrasyonu ve su kalitesini düşürmekte, bu da su florası ve faunası üzerinde ciddi etkilere neden olmaktadır (Nejad, Borghei, ve Yaghmaei, 2019). Öte yandan, suyun rengi nedeni ile de estetik açıdan su kütlelerinde istenmeyen bir durum oluşturmaktadır (Gioia, Ovsejevi, Manta, Míguez, ve Menéndez, 2018; Ali, 2010). Ayrıca boyarmaddelerin ve oluşan yan ürünlerinin toksik olmaları, canlı organizmalar üzerinde mutajenik ve kanserojenik etki göstermektedir (Hassaan ve Nemr, 2017; Ali, 2010). Alıcı ortamlarda oluşturdukları çevresel problemler nedeni ile atıksulardan renk giderimini zorunlu hale getirmiştir.

Boyarmadde içeren atıksuların arıtımında kullanılan adsorpsiyon, oksidasyon, ozonlama, iyon değişimi, membran filtrasyon, koagülasyon-flokülasyon, ileri oksidasyon gibi fiziksel ve kimyasal arıtım yöntemleri yüksek maliyet, tüm boyarmadde atıksularında etkili olamama, kısa yarılanma ömrü, toksik oksidasyon reaktif kullanımı ve hatta arıtmadan sonra konsantre çamur ve toksik yan

ürün oluşumu gibi dezavantajlara sahiptir (Paz, Carballo, Pérez, ve Domínguez, 2017; Couto, 2009; Gedikli, Aytar, Çabuk, Ünal, ve Kolankaya, 2010). Bu dezavantajlardan dolayı biyolojik bozunma yöntemleri; düşük enerji maliyeti, özgünlüğü, kontrol kolaylığı ve çevre dostu olmaları nedeniyle daha fazla ilgi görmeye başlamıştır (Shanmugam, Ulaganathan, Swaminathan, Sadhasivam, ve Wu, 2017). Son zamanlarda yapılan araştırmalarda, atıksulardaki boyarmaddelerin varlığını ortadan kaldırmak veya azaltmak için, geniş bir substrat aralığına sahip enzimlerin kullanımının umut verici yöntemlerden birini oluşturduğu görülmüştür. Biyokatalizör olarak işlev gören enzimler, atık su içeriğinde bulunan protein, yağ, gres, pestisit ve farmasötik kalıntılar gibi geniş bir spektrumdaki organik kirleticilerin biyodegradasyonunda yüksek etkinlik sergilemektedir (Feng vd., 2025). Bu enzimlerden önemli olanları; lignin peroksidazlar (LiP), mangan peroksidazlar (MnP) ve lakkazlardır (Couto, 2009).

Yaşamın devamlılığı için temel olan enzimler, tüm canlı hücreler tarafından sentezlenebilen biyokatalizörlerdir. Atık su arıtımında kullanılan enzimler hayvanlar, bitkiler, mantar ve bakteriler tarafından salgılanabilir. Güncel uygulamalarda ise yüksek verimlilikleri nedeniyle özellikle mantar ve bakteri kökenli mikrobiyal enzimler ön plana çıkmaktadır (Feng vd., 2021).

Peroksidazlar elektron alıcısı olarak toksik etkilere sahip olan hidrojen peroksiti kullanırken, lakkaz enzimleri moleküler oksijeni kullanmaktadır (Gedikli, 2010; Camarero vd., 2005). Ne yazık ki, lakkaz enziminin düşük redoks potansiyeli (0.5-0.8 V), yalnızca düşük redoks potansiyeline sahip olan fenolik bileşiklerin doğrudan bozunmasına izin verirken, bazı sentetik boyarmaddelerin dahil olduğu dirençli aromatiklerin oksidasyonuna izin vermez. Bu nedenle, lakkaz enzimi ile birlikte yüksek redoks potansiyeline (> 0.9 V) sahip (Chhabra, Mishra, ve Sreekrishnan, 2008) küçük organik bileşikler (medyatörler) kullanılmaktadır (Camarero vd., 2005; Chhabra vd., 2008; Martorana, Sorace, Boer, Vazquez-Duhaldt, Basosi, ve Baratto, 2013). Medyatörler, yapısal engellerden dolayı aktif bölgeye giremeyen karmaşık substratların oksidasyonunu sağlayan elektron mekikleri gibi davranırlar. Enzim tarafından oksitlendikten ve az ya da çok kararlı radikallerde stabilize edildikten sonra, medyatörler enzimatik alandan çok uzağa yayılırlar ve enzimatik olandan farklı mekanizmalarla, yüksek boyutları veya yüksek redoks potansiyelleri nedeniyle hedef bileşiklerin oksidasyonunu sağlarlar. Boyarmaddelerin renginin giderilmesinde çeşitli sentetik (2,20-Azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulphonate (ABTS), 1-Hydroxybenzotriazole (HBT), Violuric Acid vb.) ve doğal medyatörler (Acetosyringone, Syringaldehyde, Acetovanillone, Vanillin vb.) kullanılmaktadır. Doğal medyatörler, daha verimli, daha ucuz ve çevre dostu olmaları nedeniyle sentetik medyatörlere göre ön plana çıkmaktadır (Camarero vd., 2005; Martorana vd., 2013). Camarero vd. (2005) Reactive black 5 (RB5) boyarmaddesi kullanarak *P.cinnabarinus* lakkazı ile 44 bileşiğin (fenolik alkoller, aldehytler, ketonlar, asitler, esterler ve bazı aminler) medyatör olarak kullanılabilirliğini değerlendirmiştir. Bunlar arasında acetosyringone ve syringaldehyde en yüksek renk giderme oranlarını sağlamıştır. Çalışmada ayrıca 6 boyarmaddenin (Reactive black 5, Azure B, Reactive blue 19, Reactive blue 38, Aniline blue, Acid blue 74) *P.cinnabarinus* ve *T. villosa* lakkazları ile 10 doğal ve 8 sentetik medyatörün renk giderim verimleri incelenmiştir. Farklı boyarmadde ve dirençli bileşiklerin lakkaz enzimi ile gideriminde, syringaldehyde ve acetosyringone medyatörleri oksidasyonun hem hızı hem de etkinliği arttırmış ve sentetik medyatörlere göre çevre dostu alternatifler olduğu görülmüştür.

Peroksidazlar, aromatik boyaların çökeltme yoluyla veya aromatik halka yapısını açarak bozunmasını/dönüşümünü katalize edebilir. Lignin peroksidazlar, mangan peroksidazlar ve çok yönlü peroksidazlar, ticari boyaların arıtılmasında kullanılmaktadır. Moreira, Palma, Mielgo, Feijoo, ve Lema (2001), oldukça dirençli polimerik bir boya olan Poly R-478'in in vitro bozunması için ligninolitik enzim MnP'nin enzimatik etkisini incelemiştir. Enzimatik işlem, sadece kromoforik

grupların yıkımını değil, aynı zamanda boyanın kimyasal yapısında da belirgin bir bozulmayı katalize etmiştir. Verma ve Madamwar (2005), basidiomycete PV002'nin, statik koşullar altında sırasıyla 5. ve 9. günlerde Ranocid Fast Blue'yu (%96) ve Acid Black 210'u (%70) etkili bir şekilde renk giderdiğini tespit etmiştir. Singh ve Dwivedi (2022), *Aspergillus terreus* GS28 mantarı tarafından yüksek konsantrasyonlardaki Direct Blue-1'in (DB-1) renk giderilmesi için, MnP ve lakkaz kombinasyonu kullanmıştır. 168 saat içinde 100 mg/L'lik başlangıç boya konsantrasyonu için renk giderim oranı %98,4 olarak bulunurken, ürünün toksisitesi de azalmıştır.

#### 4. MİKROBİYAL ENZİM SİSTEMLERİNİN ETKİNLİĞİNİ ARTIRMA YÖNTEMLERİ

Doğal kaynaklardan izole edilen veya doğal hallerindeki enzimler, piyasadaki tüketici gereksinimlerini karşılayamamaktadır (Sharma, Gupta, Ahmad, Mansoor, ve Kaur, 2021) Serbest enzim sistemlerinde ham ve saflaştırılmış enzimler, kirleticileri gidermede iyi performans göstermektedir. Ancak bu enzimlerin pahalı olması ve atık su arıtımında geri dönüştürülemeyen enzimlere olan büyük talep, bu sistemleri uygulanabilir olmaktan çıkarır (Feng vd., 2021). Mikrobiyal enzimlerin endüstriyel atıksu arıtımında sunduğu biyokatalitik potansiyel, serbest haldeki enzimlerin operasyonel kısıtlılıkları nedeniyle sıklıkla sınırlanmaktadır. Özellikle biyoreaktör ortamındaki ekstrem pH değerleri, yüksek sıcaklık dalgalanmaları, inhibitör varlığı ve enzimin ortamdan geri kazanılamaması, bu sistemlerin ekonomik sürdürülebilirliğini olumsuz etkileyen temel faktörlerdir (Al-Maqdi vd., 2021; Mokrani ve Nabti, 2024). Günümüzde, enzimlerin aktivitesini artırmak, karmaşık endüstriyel uygulamaların gereksinimlerini karşılamak ve enzimlerin katalitik performansını optimize etmek amacıyla; enzimin yapısal stabilitesini artıran immobilizasyon teknikleri (Al-Maqdi vd., 2021), reaksiyon kinetiğini hızlandıran medyatör sistemleri (Feng vd., 2021; Al-Maqdi vd., 2021; Zheng vd., 2024) ve enzimatik direnci artıran moleküler modifikasyonlar (Mokrani ve Nabti, 2024) gibi stratejik yöntemler geliştirilmiştir.

##### 4.1. İmmobilizasyon Teknikleri

Enzimlerin biyoteknolojik süreçlerdeki potansiyeli; sınırlı raf ömrü, düşük stabilite ve operasyonel koşullara olan yüksek hassasiyetleri nedeniyle kısıtlanmaktadır. Bu olumsuzlukları minimize etmek amacıyla geliştirilen immobilizasyon teknikleri, enzimlerin fizikokimyasal dirençlerini artırarak endüstriyel ölçekte kullanımlarını mümkün kılmaktadır (Maghraby, El-Shabasy, Ibrahim, ve El-Said Azzazy, 2023; Mateo, Palomo, Fernandez-Lorente, Guisan, ve Fernandez-Lafuente, 2007). Enzim immobilizasyonunun, katalitik aktiviteyi ve çoklu tekrar kullanılabilirliği artırmak, toksisiteyi azaltmak, biyoyoumluluk, kolay işlem, çevresel değişikliklere direnç ve düşük maliyet sağlamak gibi çeşitli avantajları vardır (Mohidem, Mohamad, Rashid, Norizan, Hamzah, ve Mat, 2023; Rafiee ve Rezaee, 2021). Enzim immobilizasyonu, enzimin reaksiyon ortamından daha kolay ayrılmasını sağlayarak, sonraki işlemleri basitleştirir. Bu teknoloji, enzimi sert reaksiyon koşullarından kaynaklanan bozulma veya inaktivasyondan koruyarak, onu daha sağlam ve çeşitli uygulamalarda kullanılmaya uygun hale getirir (Mohidem, vd., 2023). İmmobilizasyon teknikleri geri dönüşümlü ve geri dönüşümsüz immobilizasyon teknikleri şeklinde iki sınıfta değerlendirilir. Geri dönüşümlü immobilizasyon tekniği; adsorpsiyon, iyonik bağlama ve metal bağlama süreçlerini kapsar. Geri dönüşümsüz immobilizasyon tekniği ise; enzimin matris içine hapsedilmesi ve kovalent bağlanma yoluyla gerçekleştirilir (Maghraby vd., 2023; Mateo vd., 2007).

Lakkaz, preoksidazlar ve azo redüktazlar gibi boya gideriminde kullanılan çeşitli enzimler, özellikle doğal formlarında kullanıldıklarında aktivitelerini kaybederler. Bu dezavantajların ortadan

kaldırmak için enzimlere immobilizasyon teknikleri uygulanmaktadır (Maghraby vd., 2023). Çapraz bağlı bir lakkaz kitosan, metal bir ligand Cu(II) iyonuna bağlanarak, atık sudaki üç tip boyanın (cibacron mavisi, metil turuncu ve reaktif siyah 5) parçalanmasında kullanılmış, sırasıyla %69, %87 ve %43 oranında giderim verimliliği elde edilmiştir. Bunun yanı sıra, immobilize edilmiş enzimin kalan verimliliğinin 20 su arıtma döngüsünden sonra bile %81 olduğu bildirilmiştir (Bayramoglu, Gursel, Yilmaz, ve Arica, 2012). Başka bir çalışmada, bir aracı madde (yani, glisidil metakrilat fonksiyonlu poliakrilamid-aljinat) kullanılarak hareketsizleştirilmiş lakkazın atık suların arıtılması üzerindeki etkisi kovalent bağlama kullanılarak yapılmış ve giderim verimliliği %55 olarak tespit edilmiştir (Sondhi, Sharma, Saini, Puri, ve Gupta, 2014). Ek olarak, Cu-aljinat boncuklarına hapsedilmiş hareketsizleştirilmiş lakkaz enzimi aracılığıyla boyaların karmaşık polimerleri oksitlenerek atık suyun renginde %66 oranında azalma sağlanmış ve hareketsizleştirilmiş bu enzimler, 15 gün boyunca depolama süresince aktivitelerinin %95'ini korumuşlardır (Sondhi, Kaur, Kaur, ve Kaur, 2018).  $TiO_2-ZrO_2-SiO_2$  üzerine adsorbe edilmiş lakkaz, tekstil atıksuyundaki boyaların parçalanmasında kullanılmıştır.  $TiO_2-ZrO_2-SiO_2$ -lakkaz için immobilizasyon verimliliği %96 iken, boyaların parçalanma oranları reaktif siyah, alizarin kırmızısı S ve remazol parlak mavi R için sırasıyla %77, %100 ve %91'e ulaşmıştır (Anteckta vd., 2018).

Manganez peroksidaz, organik kirleticilerin parçalanmasında yüksek etkinliğe sahiptir (Maghraby vd., 2023).  $Fe_3O_4$ /kitosan ile kovalent olarak bağlanmış manganez peroksidazın, metilen mavisi ve reaktif turuncu 16'nın giderilmesinde önemli bir etkisi olmuş ve hatta boya giderme işleminin 5 döngüsünden sonra dahi aktivitesi sabit kalmıştır (Siddeeg, Tahoon, Mnif, ve Ben Rebah, 2020). Bilal, Asgher, Iqbal, Hu, ve Zhang (2016) 'nin yaptığı çalışmada ise aynı enzimin boya giderme etkinliği araştırılmış, enzim bu sefer glutaraldehit/kitosan üzerine çapraz bağlanmıştır. Maksimum boya bozunması %97 olarak elde edilmiş ve konjugat, 10 tekrarlanan renk giderme döngüsünden sonra dahi etkinliğini %60 korumuştur.

#### 4.2. Medyatör sistemleri (Enzim araçlarıyla ilgili sistemler)

Enzim araçları (mediatörler), enzim ile substrat arasında elektron transferini kolaylaştıran, düşük moleküler ağırlıklı ve kararlı bileşiklerdir. Bu moleküller, yüksek reaktiviteye sahip radikaller üreterek enzimin etki edebileceği substrat yelpazesini genişletir. Özellikle enzimin redoks potansiyeli substratından daha yüksek olduğunda, bu küçük moleküller oksidasyon sürecini iyileştirerek enzimatik reaksiyonun hızlanmasını sağlar. Sonuç olarak, aracı moleküllerin kullanımı hedef kirleticilerin giderilmesinde operasyonel verimliliği önemli ölçüde artırmaktadır (Feng vd., 2021). Enzim araçları, doğal ve sentetik araçlar olarak ikiye ayrılabilir. Boyarmaddelerin renginin giderilmesinde çeşitli sentetik (2,20-Azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulphonate (ABTS), 1-Hydroxybenzotriazole (HBT), Violuric Acid vb.) ve doğal medyatörler (Acetosyringone, Syringaldehyde, Acetovanillone, Vanillin vb.) kullanılmaktadır. Doğal medyatörler, daha verimli, daha ucuz ve çevre dostu olmaları nedeniyle sentetik medyatörlere göre ön plana çıkmaktadır (Camarero vd., 2005; Martorana vd., 2013). Bunlar enzim aktivitesini ve enzimatik süreci iyileştirme yeteneğine sahiptir (Feng vd., 2021).

Parlak renkli, suda çözünebilen reaktif ve asit boyarmaddeler geleneksel arıtma sistemlerinden etkilenmeden çıktıklarından bu boyarmaddeler, çevre açısından en sorunlu boyarmaddeler olarak değerlendirilmektedir. Bu boyarmaddelerin gideriminde lakkaz enziminin ve lakkaz-medyatör sistemlerinin başarılı olduğu görülmüştür. Cristóvão, Tavares, Loureiro, Boaventura, ve Macedo (2009) çalışmalarında *Aspergillus* ticari lakkazı kullanarak Reactive yellow 15, Reactive red 239 ve Reactive black 5 boyarmaddelerinin renk giderimini incelemişlerdir. Çalışma sonunda sırasıyla %63'



ün üzerinde, %41 civarında ve %86'nın üzerinde giderim verimi elde edilmiştir. Aynı lakkaz kaynağı ile yapılan başka bir çalışmada ise farklı sentetik medyatörler (ABTS, HBT, violuric acid, TEMPO, *N*-hydroxyacetanilide, polioxometalates) kullanılarak çeşitli reaktif boyarmaddelerin (Reactive black 5, Reactive yellow 176, Reactive yellow 15, Reactive red 239, Reactive red 180, Reactive blue 114) giderimi yapılmıştır. Maksimum renk giderimini ABTS medyatörünün sağladığı ve Reactive black 5, Reactive yellow 15, Reactive blue 114 boyarmaddelerinde %70'in üzerinde, Reactive red 239 'da %56'nın üzerinde, Reactive red 180'de ise %93 giderim gerçekleştirdiği belirtilmiştir (Tavares, Cristóvão, Loureiro, Boaventura, ve Macedo, 2008).

Bibi ve Bahatti (2012) *Trametes versicolor*'dan elde edilen ticari lakkaz ve farklı sentetik ve doğal redoks medyatörleri (N-hydroxybenzotriazole (HBT), 2,2'-azino-bis-(3-ethylbenzthiazoline- 6-sulfonic acid (ABTS), 2,6-dimethoxy phenol (DMP), syringaldehyde, vanillin, aceto-vanillone, *p*-coumaric acid ve catechol) kullanarak Reactive black 5 (RB5) boyarmaddesinin biyodekolorizasyonunu incelemişlerdir. Tek başına ticari lakkaz, RB5'te önemli bir renk giderimi göstermemiştir. Bununla birlikte, syringaldehyde varlığında lakkaz, en güçlü renk giderme oranına (%98) sahip olurken, onu vanillin (%55.21), acetovanillone (%53.25), ABTS (%42.78), *p*-coumaric acid (%41.9), DMP (%39) ve catechol (%36.33) takip etmiştir ve HBT ile en az renk giderimi gözlenmiştir. Syringaldehydeninin sentetik HBT'ye göre etkili bir doğal redoks medyatörü olduğu görülmüştür. Yang ve ark. (2017) ise izole edilmiş *T. versicolor* CBR43'ten elde edilmiş lakkaz enziminin renk giderimindeki etkinliğini değerlendirmek için asit, dispers ve reaktif boyarmaddeler kullanmıştır. Asit boyarmaddelerin (red 114, blue 62 ve black 172) ve reaktif boyarmaddelerin (red 120, blue 4, orange 16 ve black 5) renk gideriminde %90'dan fazla, Acid orange 7 nin renk gideriminde %67 verim elde edilmiştir. Dispers boyarmaddeler (red 1, orange 3 ve black 1) için renk giderim verimleri ise %51–80 olmuştur.

Enzimatik giderim prosesinde bozunma süreçlerini etkileyen pek çok faktör vardır. Bu faktörlerin belirlenip optimize edilebilmesi ve faktörler arasında olabilecek olası sinerjik veya antagonistik etkileşimlerin değerlendirilebilmesi gerekir. Daâssi, Frikha, Zouari-Mechichi, Belbahri, Woodward, ve Mechichi (2012) tarafından yapılan çalışmada, Reactive black 5 (RB5), İndigo carmine (IC) ve Aniline blue (AB) boyarmaddelerinin renk giderimi optimize edilmiştir. Giderim prosesinde, *Trametes troglit*'den elde edilen ham lakkaz ve lakkaz-mediatör sistemi için 1-hydroxybenzotriazole (HBT) kullanılmıştır. Boyarmaddelerin gideriminde pH, sıcaklık, enzim konsantrasyonu, HBT konsantrasyonu, boyarmadde konsantrasyonu ve inkübasyon süresi olmak üzere altı değişkenin etkileri optimize edilmiştir. RB5'in maksimum renk giderimi (yaklaşık %92.92±7.21) için optimum pH, sıcaklık, lakkaz, HBT, RB5 ve reaksiyon süresi sırasıyla 4.5, 0.5 U/ml 0.5 mM, 100 mg/ml ve 150 dakika olarak tespit edilmiştir. Oysa hem IC (%99,76 ±7,75) hem de AB (%98,44± 10) için optimum renk giderim koşulları: pH 4.5, 45°C sıcaklık, 0.1 U/ml ve 0.5 U/ml enzim konsantrasyonu ve 0.9 mM ve 0.5 mM HBT konsantrasyonu, 60 mg/l boya konsantrasyonu ve 150 ve 90 dakikalık reaksiyon süresi olarak tespit edilmiştir.

Son olarak lakkaz enzimi toksik boyarmaddeleri potansiyel olarak, ikincil kirlilik oluşumunu atlayarak, toksik olmayan veya daha güvenli olan son ürünlere dönüştürmekte veya bozmaktadır. *T. asperellum* lakkazı ile yapılan giderim çalışmasında Malaşit yeşili boyarmaddesinin giderimi sonucu oluşan metabolitlerinin arıtılmamış boyarmaddeden çok daha az toksik olduğu gözlenmiştir (Shanmugam vd., 2017). Chhabra ve ark. (2008) lakkaz (*C. bulleri*) ve medyatör (doğal ve sentetik) kullanarak yaptıkları çalışmada ise reaktif ve asit boyarmaddelerinin arıtımı sonucunda respirometrik toksisiteyi ve genotoksitesite/mutajeniteyi incelemişlerdir. Lakkaz-medyatör sistemi ile arıtımı yapılan boyarmadde karışımına karşı *P. putida* herhangi bir solunum inhibisyonu göstermemiş, bu da toksik yan ürünlerin birikmediğini ortaya koymuştur.

### 4.3. Moleküler Modifikasyonlar

Genetik mühendisliği, organizmalar arasında belirli genlerin istenen bir işlevini veya özelliğini silmek veya dahil etmek için genleri bir varlığa aktarma veya değiştirme yöntemidir (Sai, Siva, Kishore, Dattatreya, Anand, ve Sridhari, 2011). Bu yöntem nihayetinde, belirli bir enzimi doğal olarak üreten mikroorganizmanın (donör) ilgili genini, enzimi daha etkili bir şekilde sentezleyen farklı bir mikroorganizmaya (konak) almayı içerir (Gurung, Ray, Bose, ve Rai, 2013). Genetik değişiklikler çok önemlidir ve rekombinant DNA teknolojilerinin gelişimi 100 kat artmıştır. Örneğin, genetik diziler (yer yönlendirmeli mutasyon), transkripsiyon faktörleri, promotörler, gen kopyası sayısı, lider peptitler, şaperonlar, kodonlar ve glikozilasyon ve enzim katlanması gibi yapısal seviyelerdeki değişiklikler, selüloz üreten güçlü suşların üretimine yol açmıştır (Mokrani ve Nabti, 2024).

## 5. SONUÇ

Atıksu arıtımında enzimatik süreçlerin başarısı, genellikle dekolorizasyon gibi görsel parametreler üzerinden değerlendirilse de gerçek sürdürülebilirlik; ekolojik güvenlik, düşük enerji sarfıyatı ve kaynakların yeniden kullanımı üzerine kurulu çok boyutlu bir yaklaşımı zorunlu kılmaktadır. Bir arıtma stratejisinin "yeşil" kabul edilebilmesi için detoksifikasyon analizlerinin yapılması (Khlifi vd., 2010) ve sürecin ekonomik olarak ölçeklenebilir olması şarttır. Özellikle lakkaz-mediyatör sistemleri gibi ileri uygulamalarda, enzimin operasyonel ömrünün uzatılması ve çevresel maliyetlerin minimize edilmesi, döngüsel ekonomi ilkeleriyle doğrudan ilişkilidir.

Ancak günümüzde endüstriyel süreçlerin karmaşıklaşması ve yapay substrat çeşitliliğinin artması, doğadaki mevcut enzimlerin ötesinde yeni biyokatalizör arayışlarını zorunlu kılmaktadır. Geleneksel mikrobiyal enzimlerin sergilediği düşük verim ve yetersiz katalitik kararlılık sorunları; bu moleküllerin rDNA teknolojileri ve moleküler modifikasyon gibi stratejilerle özelleştirilmesini gerektirmektedir. Özellikle yeşil enerjiye geçiş ve çevre kirliliğiyle mücadele trendleri, inovatif genetik mühendisliği teknikleriyle birleştiğinde, enzim teknolojilerini sürekli gelişen dinamik bir disiplin haline getirmektedir.

Bu süreçte, enzim verimliliğini ve yeniden kullanılabilirliğini artıran immobilizasyon teknikleri, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada en vaat edici stratejilerden biri olarak öne çıkmaktadır. Sonuç olarak, mikrobiyal enzimlerin küresel pazarın artan ihtiyaçlarına cevap verebilmesi; teknolojik süreçlerin optimizasyonu, maliyetlerin düşürülmesi ve yeni nesil teknolojilere entegrasyonu ile mümkün olacaktır. Bu entegrasyon, gelecekteki araştırmaların temel odağını ve çevre dostu endüstriyel dönüşümün anahtarını oluşturacaktır.

## KAYNAKLAR

1. Ali, H. (2010). Biodegradation of Synthetic Dyes—A Review. *Water Air Soil Pollut*, 213,251–273. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0382-4>
2. Albuquerque, T.L., Rocha, P. Ve Valdez, M. (2019). Biotechnological Strategies for the Lignin-Based Biorefinery Valorization. *Journal in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*. DOI:10.1016/b978-0-12-409547-2.14570-6
3. Al-Maqdi, K. A., Elmerhi, N., Athamneh, K., Bilal, M., Alzamy, A., Ashraf, S. S., ve Shah, I. (2021). Challenges and Recent Advances in Enzyme-Mediated Wastewater Remediation—A Review. *Nanomaterials*, 11(11), 3124. <https://doi.org/10.3390/nano11113124>
4. Anteck, K., Zdarta, J., Siwińska-Stefańska, K., Sztuk, G., Jankowska, E., Oleskiewicz-Popiel, P. ve Jesionowski, T. (2018). Synergistic degradation of dye wastewaters using binary or ternary oxide systems with immobilized laccase. *Catalysts*, 8(9), 402. <https://doi.org/10.3390/catal8090402>
5. Barber-Zucker, S., Mindel, V., Garcia-Ruiz, E., Weinstein, J.J., Alcalde, M. ve Fleishman S.J. (2022). Stable and Functionally Diverse Versatile Peroxidases Designed Directly from Sequences. *Journal of the American Chemical Society* 144 (8), 3564-3571. <https://doi.org/10.1021/jacs.1c12433>
6. Bayramoglu, G., Gursel, I., Yilmaz, M. ve Arica, M. (2012). Immobilization of laccase on itaconic acid grafted and Cu(II) ion chelated chitosan membrane for bioremediation of hazardous materials. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 87(4), 530– 539. DOI: 10.1002/jctb.2743
7. Bhandari, S., Poudel, D.K., Marahatha, R., Dawadi, S., Khadayat, K., Phuyal, S., Shrestha, S., Gaire, S., Basnet, K., Khadka, U. ve Parajuli, N. (2021). Microbial Enzymes Used in Bioremediation, *Journal of Chemistry*, 8849512, 17. <https://doi.org/10.1155/2021/8849512>
8. Bibi, I. ve Bhatti, H.N. (2012). Enhanced Biodecolorization of Reactive Dyes by Basidiomycetes Under Static Conditions. *Appl Biochem Biotechnol*, 166,2078–2090. <https://doi.org/10.1007/s12010-012-9635-6>
9. Bilal, M., Asgher, M., Iqbal, M., Hu, H. ve Zhang, X. (2016). Chitosan beads immobilized manganese peroxidase catalytic potential for detoxification and decolorization of textile effluent. *Int. J. Biol. Macromol.*, 89, 181– 189. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.04.075>
10. Cañas, A.I. ve Camarero, S. (2010). Laccases and their natural mediators: biotechnological tools for sustainable eco-friendly processes. *Biotechnology Advances*, 28,694-705. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.05.002>
11. Camarero, S., Ibarra, D., Martínez, M.J. ve Martínez, A.T. (2005). Lignin-Derived Compounds as Efficient Laccase Mediators for Decolorization of Different Types of Recalcitrant Dyes. *Applied and Environmental Microbiology*, 71(4),1775–1784. DOI: [10.1128/AEM.71.4.1775-1784.2005](https://doi.org/10.1128/AEM.71.4.1775-1784.2005)
12. Chhabra, M., Mishra, S. ve Sreekrishnan, T.R. (2008). Mediator-assisted Decolorization and Detoxification of Textile Dyes/Dye Mixture by *Cyathus bulleri* Laccase. *Appl Biochem Biotechnol*, 151(2-3),587–598. DOI: [10.1007/s12010-008-8234-z](https://doi.org/10.1007/s12010-008-8234-z)
13. Couto, S.R. (2009). Dye removal by immobilised fungi. *Biotechnology Advances*, 27(3), 227-235. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.12.001>
14. Cristóvão, R.O., Tavares, A.M.P., Loureiro, J.M., Boaventura, R.A.R. ve Macedo, E.A. (2009). Treatment and kinetic modelling of a simulated dye house effluent by enzymatic catalysis. *Bioresource Technology*, 100(24), 6236-6242. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.07.007>
15. Daâssi, D., Frikha, F., Hela Zouari-Mechichi, Belbahri, L., Woodward, S. ve Mechichi, T. (2012). Application of response surface methodology to optimize decolourization of dyes by the

- laccase-mediator system. *Journal of Environmental Management*, 108: 84-91. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.04.039>
16. Eid, B.M. ve Ibrahim, N.A. (2021). Recent developments in sustainable finishing of cellulosic textiles employing biotechnology, *Journal of Cleaner Production*, 284,124701, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124701>.
  17. Feng, S., Ngo, H.H., Guo, W., Soon W.C., Dinh, D.N., Dongle, C., Sunita, V., Zhongfang, L. ve Yi, L. (2021). Roles and applications of enzymes for resistant pollutants removal in wastewater treatment, *Bioresource Technology*, 335, 125278, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125278>.
  18. Feng, S., Guo, W., Ding, A., Parsa, S.M., Pan, J., Cheng, D., Tung, T.V. ve Ngo, H.H. (2025). Enzyme sources in wastewater treatment: Their influence on enzymatic bioremediation and large-scale applications, *Chemical Engineering Journal*, 510, 161891. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.161891>.
  19. Fetzner S. ve Lingens, F. (1994). Bacterial dehalogenases: biochemistry, genetics, and biotechnological applications. *Microbiological Reviews*, 58(4), 641–685, doi: 10.1128/mr.58.4.641-685.1994.
  20. Gedikli, S., Aytar, P., Çabuk, A., Ünal, A. ve Kolankaya, N. (2010). Lakkaz enzimi ile kot boyarmaddesinin dekolorizasyonu. *Anadolu University Journal of Science And Technology –C Life Sciences and Biotechnology*, 1(1):59-70.
  21. Gianfreda, L., Xu, F. ve Bollag, J.M. (1999). Laccases: a useful group of oxidoreductive enzymes. *Bioremediation Journal*, 3(1), 1–25. <https://doi.org/10.1080/10889869991219163>
  22. Gioia, L., Ovsejevi, K., Manta, C., Míguez, D. ve Menéndez, P. (2018). Biodegradation of acid dyes by an immobilized laccase: an ecotoxicological approach. *Environ. Sci.: Water Res. Technol.*, 4,2125-2135. <https://doi.org/10.1039/C8EW00595H>
  23. Gurung, N., Ray, S., Bose, S. ve Rai, V. (2013). A broader view: microbial enzymes and their relevance in industries, medicine, and beyond. *Biomed Res Int.*2013:329121. doi: 10.1155/2013/329121.
  24. Hafez, N. (2021). Enzymatic Waste Water Treatment. *World Science*, 6(67). DOI:[10.31435/rsglobal\\_ws/30062021/7611](https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30062021/7611)
  25. Hassaan, M.A. ve Nemr, A.E. (2017). Health and Environmental Impacts of Dyes: Mini Review. *American Journal of Environmental Science and Engineering*, 1(3),64-67. doi: 10.11648/j.ajese.20170103.11
  26. Howden, A.J., ve Preston, G.M. (2009). Nitrilase enzymes and their role in plant-microbe interactions. *Microbial biotechnology*, 2(4), 441–451. <https://doi.org/10.1111/j.1751-7915.2009.00111.x>
  27. Ilyas, A. ve Batool, K. (2025). Innovative Enzymatic and Microbial Approaches for Wastewater Bioremediation: Advances in Enzyme Engineering, Biotechnology, and Nanotechnology for Sustainable Water Management—A Comprehensive Review. *Premier Journal of Science*, 9:100074. DOI: <https://doi.org/10.70389/>
  28. Karigar, C.S. ve Rao, S.S. (2011). Role of Microbial Enzymes in the Bioremediation of Pollutants: A Review, *Enzyme Research*, 805187, 11. <https://doi.org/10.4061/2011/805187>
  29. Khan, M.F. (2025). Recent Advances in Microbial Enzyme Applications for Sustainable Textile Processing and Waste Management. *Sci*, 7, 46. <https://doi.org/10.3390/sci7020046>
  30. Khlifi, R., Belbahri, L., Woodward, S., Ellouz, M., Dhouib, A., Sayadi, S. ve Mechichi, T. (2010). Decolourization and detoxification of textile industry wastewater by the laccase-mediator system, *Journal of Hazardous Materials*, 175(1–3), 802-808. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.079>.

31. Kumar, A. ve Arora, P.K. (2022). Biotechnological Applications of Manganese Peroxidases for Sustainable Management. *Front. Environ. Sci.* 10,875157. doi: 10.3389/fenvs.2022.875157
32. Kumar, M., Abhinav, R., Singh, D., Panwar, A. ve Manna, S. (2025). Microbial enzyme-based water treatment in smart cities: A synoptic review. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 46, 100640. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2025.100640>.
33. Maghraby, Y.R., El-Shabasy, R.M., Ibrahim, A.H. ve El-Said Azzazy H.M. (2023). Enzyme Immobilization Technologies and Industrial Applications. *ACS Omega* 8(6), 5184-5196. DOI: 10.1021/acsomega.2c07560
34. Mai, C. Schormann, W., Milstein, O. ve Huttermann, A. (2000). Enhanced stability of laccase in the presence of phenolic compounds. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 54(4), 510–514. DOI: [10.1007/s002530000452](https://doi.org/10.1007/s002530000452)
35. Martorana, A., Sorace, L., Boer, H., Vazquez-Duhaldt, R., Basosi, R. ve Baratto, MC. (2013). A spectroscopic characterization of a phenolic natural mediator in the laccase biocatalytic reaction. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 97:203–208. <https://doi.org/10.1016/j.molcatb.2013.08.013>
36. Mateo, C., Palomo, J.M., Fernandez-Lorente, G., Guisan, J.M. ve Fernandez-Lafuente, R. (2007). Improvement of enzyme activity, stability and selectivity via immobilization techniques, *Enzyme and Microbial Technology*, 40(6), 1451-1463, <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2007.01.018>.
37. Mazotto, A.M., de Ramos Silva, J., de Brito, L.A.A., Rocha, N.U. ve de Souza Soares, A. (2021). How can microbiology help to improve sustainability in the fashion industry? *Environ. Technol. Innov.* 23, 101760. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101760>
38. Mohidem, N. A., Mohamad, M., Rashid, M. U., Norizan, M. N., Hamzah, F., & Mat, H. b. (2023). Recent Advances in Enzyme Immobilisation Strategies: An Overview of Techniques and Composite Carriers. *Journal of Composites Science*, 7(12), 488. <https://doi.org/10.3390/jcs7120488>
39. Mokrani, S. ve Nabti, E.H. (2024) Recent status in production, biotechnological applications, commercial aspects, and future prospects of microbial enzymes: A comprehensive review. *Int J Agric Sc Food Technol* 10(1), 006-020. DOI: [10.17352/2455-815X.000202](https://doi.org/10.17352/2455-815X.000202)
40. Moreira, M.T., Palma, C., Mielgo, I., Feijoo, G. ve Lema J.M. (2001). In Vitro Degradation of a Polymeric Dye (Poly R-478) by Manganese Peroxidase. *Biotechnology and Bioengineering*, 75(3).
41. Mousavi, S.M., Hashemi, S.A., Iman Moezzi, S.M., Ravan, N., Gholami, A., Lai, C.W., Chiang, Wei-Hung, Omidifar, N., Yousefi, K. ve Behbudi, G. (2021). Recent Advances in Enzymes for the Bioremediation of Pollutants, *Biochemistry Research International*, 5599204, 12 <https://doi.org/10.1155/2021/5599204>
42. Mussakhmetov, A. ve Silayev, D. (2025). Esterases: Mechanisms of Action, Biological Functions, and Application Prospects. *Applied Microbiology*, 5(4), 139. <https://doi.org/10.3390/applmicrobiol5040139>
43. Nejad, Z.G., Borghei, S.M. ve Yaghmaei, S. (2019). Biodegradation of synthetic dye using partially purified and characterized laccase and its proposed mechanism. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16:7805–7816. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02226-5>
44. Nigam, P.S. (2013). Microbial Enzymes with Special Characteristics for Biotechnological Applications. *Biomolecules*, 3(3), 597-611. <https://doi.org/10.3390/biom3030597>
45. Paz, A., Carballo, J., Pérez, M.J ve Domínguez, J.M. (2017). Biological treatment of model dyes and textile wastewaters. *Chemosphere*, 181:168-177. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.04.046>

46. Rafiee, F. ve Rezaee, M. (2021). Different strategies for the lipase immobilization on the chitosan based supports and their applications, *International Journal of Biological Macromolecules*, 179, 170-195. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.02.198>.
47. Rodríguez Couto, S. ve Toca Herrera, J.L. (2006). Industrial and biotechnological applications of laccases: a review. *Biotechnology Advances*, 24(5), 500–513. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2006.04.003>
48. Routoula, E. ve Patwardhan, S.V. (2020). Degradation of Anthraquinone Dyes from Effluents: A Review Focusing on Enzymatic Dye Degradation with Industrial Potential. *Environmental Science & Technology*, 54(2), 647–664, <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03737>
49. Sai, Y.R.K.M., Siva Kishore, N., Dattatreya, A., Anand, S.Y. ve Sridhari, G. (2011). A Review on Biotechnology and Its Commercial and Industrial Applications. *J Biotechnol Biomaterial 1*:121. doi:10.4172/2155-952X.1000121
50. Shanmugam, S., Ulaganathan, P., Swaminathan, K., Sadhasivam, S. ve Wu, Y.R. (2017). Enhanced biodegradation and detoxification of malachite green by *Trichoderma asperellum* laccase: Degradation pathway and product analysis. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 125:258-268. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.08.001>
51. Sharma, A., Jain, K.K., Jain, A., Kidwai, M. ve Kuhad, R.C. (2018). Biofunctional in vivo role of laccase exploited in multiple biotechnological applications. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102,10327-10343. DOI: [10.1007/s00253-018-9404-8](https://doi.org/10.1007/s00253-018-9404-8)
52. Sharma, A., Gupta, G., Ahmad, T., Mansoor, S. ve Kaur, B. (2021). Enzyme Engineering: Current Trends and Future Perspectives. *Food Reviews International*, 37(2), 121–154. <https://doi.org/10.1080/87559129.2019.1695835>
53. Shome, R. (2020). Role of microbial enzymes in Bioremediation. *eLifePress*, 1(1), 15-20.
54. Siddeeg, S.M., Tahooun, M.A., Mnif, W. ve Ben Rebah, F. (2020). Iron oxide/chitosan magnetic nanocomposite immobilized manganese peroxidase for decolorization of textile wastewater. *Processes*, 8(5), DOI: 10.3390/pr8010005
55. Singh, R.S., Singh, T. ve Pandey, A. (2019). Microbial enzymes—An overview. In *Advances in Enzyme Technology*; Pandey, A., Ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands,; pp. 1–40. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64114-4.00001-7>
56. Singh, G. ve Dwivedi, S.K. (2022). Biosorptive and Biodegradative Mechanistic Approach for the Decolorization of Congo Red Dye by *Aspergillus* Species. *Bull Environ Contam Toxicol* 108, 457–467 <https://doi.org/10.1007/s00128-021-03380-8>
57. Sondhi, S., Sharma, P., Saini, S., Puri, N. ve Gupta, N. (2014). Purification and characterization of an extracellular, thermo-alkali-stable, metal tolerant laccase from *Bacillus Tequilensis* SN4. *PLoS One* 9, e96951, DOI: 10.1371/journal.pone.0096951
58. Sondhi, S., Kaur, R., Kaur, S. ve Kaur, P. S. (2018). Immobilization of laccase-ABTS system for the development of a continuous flow packed bed bioreactor for decolorization of textile effluent. *Int. J. Biol. Macromol.* 117, 1093–1100, DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2018.06.007
59. Tavares, A.P.M., Cristóvão, R.O., Loureiro, J.M., Boaventura, R.A.R. ve Macedo, E.A. (2008). Optimisation of reactive textile dyes degradation by laccase–mediator system. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 83:1609–1615. <https://doi.org/10.1002/jctb.1952>
60. Thuku, R.N., Brady, D., Benedik, M.J. ve Sewell, B.T. (2008). Microbial nitrilases: Versatile, spiral forming, industrial enzymes. *Journal of Applied Microbiology* 106(3):703-27, DOI: 10.1111/j.1365-2672.2008.03941.x

61. Ufarté, L., Laville, É., Duquesne, S. ve Potocki-Veronese, G. (2015). Metagenomics for the discovery of pollutant degrading enzymes. *Biotechnology Advances*, 33(8), 1845-1854. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.10.009>.
62. Ullah, M., Bedford, C. ve Evans, C. (2000). Reactions of pentachlorophenol with laccase from *Coriolus versicolor*. *Appl Microbiol Biotechnol.*, 53, 230–234 <https://doi.org/10.1007/s002530050013>
63. Verma, P. ve Madamwar, D. (2005). Decolorization of azo dyes using Basidiomycete strain PV 002. *World J Microbiol Biotechnol.*, 21, 481–485. <https://doi.org/10.1007/s11274-004-2047-1>
64. Yang, Q., Yang, M., Pritsch, K., Yediler, A., Hagn, A., Schloter, M. Ve Keyyru, Aç (2003). Decolorization of synthetic dyes and production of manganese-dependent peroxidase by new fungal isolates. *Biotechnology Letters* 25, 709–713. <https://doi.org/10.1023/A:1023454513952>
65. Yang, S.O., Sodaneath, H., Lee, J.I., Jung, H., Choi, J.H., Ryu, H.W. ve Cho, K.S. (2017). Decolorization of acid, disperse and reactive dyes by *Trametes versicolor* CBR43. *Journal of Environmental Science and Health*, 52(9):862-872. doi: 10.1080/10934529.2017.1316164.
66. Zaidi, K.U., Ali, A.S., Ali, S.A. ve Naaz, I. (2014). Microbial tyrosinases: promising enzymes for pharmaceutical, food bioprocessing, and environmental industry. *Biochem Res Int.*;2014:854687. doi: 10.1155/2014/854687.
67. Zheng C.-C., Gao, L., Sun, H., Zhao, X.-Y., Gao, Z.-Q., Liu, J. ve Guo, W. (2024). Advancements in enzymatic reaction-mediated microbial transformation. *Heliyon*, 10(19). e38187. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38187>





# Bölüm 5

## G20 ÜLKELERİNİN EKOLOJİK AYAK İZİ PERFORMANSININ CRITIC VE VIKOR YÖNTEMLERİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

*Fulya ZARALI<sup>1</sup>, Neslihan DEMİREL<sup>2</sup>*

1 Doç. Dr., Kayseri Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, fzarali@kayseri.edu.tr, ORCID: 0000-0002-7796-1040

2 Prof. Dr., Kayseri Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, ndemirel@kayseri.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9737-6666

## 1. GİRİŞ

Günümüz insanlığının ve gelecek kuşakların belki de en önemli sorunu, etkisi her geçen gün daha da artan küresel ısınma ve iklim değişikliği krizidir. Dünya nüfusunun giderek artması, toplumların aşırı tüketim alışkanlıkları, bilinçsizce ve fosil yakıtlara dayalı üretim, plansız kentleşme gibi unsurlar bu krizin giderek büyümesine neden olmaktadır.

Dünyamız tek olmasına rağmen dünya üzerindeki nüfus sürekli artmakta, dahası her yeni gelen nesil dünyanın doğal kaynaklarını bir öncekinden daha fazla tüketme eğilimine sahip bir yaklaşımda olmaktadır. Bu durum, doğal kaynaklara olan talebi artırmakta ve kaynakların sürdürülemez bir biçimde tükenmesine ve kirlilik ile CO<sub>2</sub> emisyonlarında dramatik artışlara yol açmaktadır. Doğal Hayatı Koruma Vakfı'nın (World Wide Fund for Nature-WWF) 2000 yılı Yaşayan Gezegen Raporu, Birleşmiş Milletler İnsan ve Çevresi Konferansı'ndan (Stockholm, 1972) bu yana, tatlı su sistemleri, deniz ekosistemleri ve orman örtüsü dâhil olmak üzere, dünyanın doğal zenginliklerinin büyük bir bölümünün yok olduğunu göstermektedir. Yaşayan Gezegen Raporu'na (2000) göre, kalan doğal ekosistemlerimizin büyüklüğü son 30 yılda %33'ün üzerinde azalırken, insanlığın doğal kaynaklara (doğal sermayeye) olan talebi aynı dönemde %50 artmıştır ve ekolojik sistemlerin kendilerini yenilenme hızını aşmaktadır (WWF Report, 2002). Bir başka ifadeyle insanlık, aşırı avlanma, ormanlık alanların yok edilmesi ve ormanların tutabileceğinden daha fazla CO<sub>2</sub> salınımı gibi faaliyetlerle doğanın yenileyebileceğinden daha fazla ekolojik kaynak ve hizmet kullanmaktadır (WWF Report, 2016). Bu aşırı tüketimin sonuçları arasında biyolojik çeşitliliğin azalması, balıkçılığın yok olması, toprak erozyonu ve iklim değişikliği yer almaktadır.

Küresel ısınma ve iklim değişikliği ile bunların yol açtığı olumsuzluklarla mücadele; bireysel, işletme düzeyinde veya sektörel olabileceği gibi şehirler, topluluklar, bölgeler ve hatta ülkeler ölçeğinde de olabilmektedir. Ülkelerin ekonomik büyüme odaklı gelişim yaklaşımı doğayla olan alışverişlerini etkilemekte ve doğal kaynakların daha hızlı tükenmesine neden olmaktadır. Bu durum, ülkelerin sürdürülebilir kalkınma modelleri benimsemesini zorunlu hale getirmiştir ve ülke düzeyinde sürdürülebilirlik performanslarının değerlendirilmesini ise popüler kılmıştır.

Sürdürülebilirlik performanslarının değerlendirilmesinde en temel araçlarından birisi Ekolojik Ayak İzi analizidir. Ekolojik Ayak İzi bir bakıma, insanlığın kalkınabilmek ve refah seviyesini artırabilmek adına doğaya olan maliyetini niceliksel olarak ortaya koymaktadır. Kavram, kendisini besleyen doğal çevre üzerinde insanlığın bıraktığı izlerin ölçüsüdür ve doğal kaynakları tüketme ve doğal kaynakların yenilenmesi için gereken zamanı ölçmektedir (WWF Report, 2002). Ülkeler çoğu zaman, sürdürülebilir kalkınma modelinin uzun vadede sağlayacağı yararları, doğadan daha çok alarak kısa vadeli ekonomik büyüme hırsları ve hızlı refah artışı karşısında kulak ardı etmektedir. Bunun sonucu olarak da iklim değişikliği ve neden olduğu olumsuzluklar her geçen gün etkisini artırmaktadır. Bu durum yalnızca gelecek nesillerin yaşam hakkını riske atmakla kalmayıp mevcut nesiller açısından da sosyal adalet duygusunu zedelemektedir. Bir taraftan gelişmiş toplumlar yüksek Ayak İzi ile küresel ısınmaya daha fazla neden olurken, bir taraftan da bunun yıkıcı etkisini en çok düşük sanayileşme, kişi başı gelir seviyesinin azlığı ve tüketim alışkanlıkları nedeniyle Ekolojik Ayak İzi düşük olan kırılgan toplumlar yaşamaktadır.

Ekolojik Ayak İzi, ülkelerin faaliyetlerinin doğaya olan maliyetini yani ekolojik sonuçlarını değerlendirmede kullanılan kabul görmüş bir yaklaşımdır ve sürdürülebilir politikalar geliştirmede önemli bir araç sağlamaktadır. Bu bölümde, G20 ülkelerinin kişi başına Ekolojik Ayak İzleri'nin çok kriterli karar verme yöntemleri (CRITIC-VIKOR) ile analizi gerçekleştirilerek karşılaştırması yapılmış ve politika önerileri geliştirilmiştir.

## 2. EKOLOJİK AYAK İZİ

Sürdürülebilir bir yaşam tarzı diğer insanlarla ve doğayla uyumu gerektirmektedir. İnsanlık yaşam biçimlerini ve kalkınmaya yönelik yol haritalarını doğanın limitlerine saygı duyarak gerçekleştirmek durumundadır (IUCN/UNEP/WWF, 1991). Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu'nun (World Commission on Environment and Development-WCED) tanımına göre Sürdürülebilir Kalkınma “gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneğinden ödün vermeden günümüzün ihtiyaçlarını karşılayan kalkınma modeli”dir (WCED, 1987).

Bu tanım, yapıldığı tarihten günümüze kabul gören ve en sık kullanılan tanımlamalardan birisidir ve içinde iki temel bileşen barındırmaktadır:

- Bunlardan ilki ‘ihtiyaçlar’ terimidir. Kavram, dünya üzerindeki yoksulların temel gereksinimleri başta olmak üzere öncelik verilmesi gereken gereksinimleri ifade etmektedir. Buradan hareketle tanım, kalkınmanın sürdürülebilir kılınmasının yalnızca ekonomik büyüme ve çevresel etkilerle sınırlı kalmaması gerektiğini ayrıca sosyal adaletin de dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır.
- Bir diğer bileşen ise mevcut teknoloji ve toplumsal örgütlenmenin, çevrenin günümüz ve gelecek nesillerin ihtiyaçlarını karşılama kapasitesini sınırladığı düşüncesidir. Bu temel bileşen de çevrenin taşıma kapasite üzerinde teknolojik ve toplumsal yapının etkisini vurgulamaktadır.

Ekolojik Ayak İzi, sürdürülebilir kalkınma için en temel kabul edilebilecek “insanlığın kullandığına kıyasla elinde ne kadar doğası var?” sorusunu yanıtlamaktadır (WWF Report, 2002). Bir başka ifadeyle insan faaliyetlerinin doğa üzerindeki baskısını ifade eden bir göstergedir. Bir bireyin, nüfusun veya faaliyetin, tükettiği tüm kaynakları üretmek ve ürettiği atıkları soğurmak için, mevcut teknoloji ve kaynak yönetimi uygulamalarını kullanarak ne kadar biyolojik olarak verimli arazi ve su alanına ihtiyaç duyduğunu ölçmektedir. Ticaret küresel çapta olduğundan bir bireyin veya ülkenin Ekolojik Ayak İzi, dünyanın her yerinden gerek duyulan arazi veya denizi içermektedir. En sık karşılaşılan Ekolojik Ayak İzi türü Tüketim Ekolojik Ayak İzi'dir (EFC-Ecological Footprint of Consumption) ve belirli bir nüfusun tüketimini desteklemek için kullanılan alan olarak tanımlanmaktadır. Tüketim Ekolojik Ayak İzi, tüketilen malzemeleri üretmek için gereken alan ile CO<sub>2</sub> emisyonlarını soğurmak için gereken alanı içermektedir.

Rees tarafından 1992 yılında ortaya atılan Ekolojik Ayak İzi kavramı, çevre sorunlarını nicel olarak ölçmenin bir yolunu sunmaktadır (Durkaya ve Kaya, 2024). Günümüzde bazı bireyler, şirketler, şehirler, topluluklar ve ülkeler Ekolojik Ayak İzi'ni önceliklemektedir. Bunun sonucunda, bilinçli üretim ve tüketim ile sosyal sorumlulukları kapsamında Ayak İzlerini azaltıcı önlemler almakta ve bu kapsamda politika ve stratejiler geliştirmektedirler. Ekolojik Ayak İzi'ne temel oluşturan veriler toplandıktan ve Ayak İzi hesaplandıktan sonra, bu veriler hem zaman içindeki eğilimleri göstermek için hem de ülkeler, bölgeler, kuruluşlar ve bireyler arasında karşılaştırma yapmak için bir gösterge olarak kullanılabilir (WWF Report, 2002). Kabul edilen stratejilerin ya da geliştirilen politikaların Ekolojik Ayak İzi'ne etkisi de bu sayede değerlendirilebilmektedir.

Çevrenin bozulması, zaman içinde artan nüfus yoğunluğu, artan enerji talebi, kentleşme ve hızlı endüstriyel gelişmeden etkilenmektedir. Ekonomik büyüme, doğal kaynakların kullanımının artmasına yol açarak çevreye önemli bir tehdit oluşturan kirliliğe neden olmaktadır. Bu nedenle, Ekolojik Ayak İzi, ülkelerin ekolojik kaynaklarını değerlendirmelerine yardımcı olmaktadır (Solarin vd., 2019; Durkaya ve Kaya, 2024).

Bu çalışma aşağıdaki şekilde organize edilmiştir: Öncelikle Bölüm 2’de Ekolojik Ayak İzi’ne ilişkin temel kavramlar ve Ekolojik Ayak İzi’nin temel bileşenlerine değinilmiştir. Bölüm 3, Ekolojik Ayak

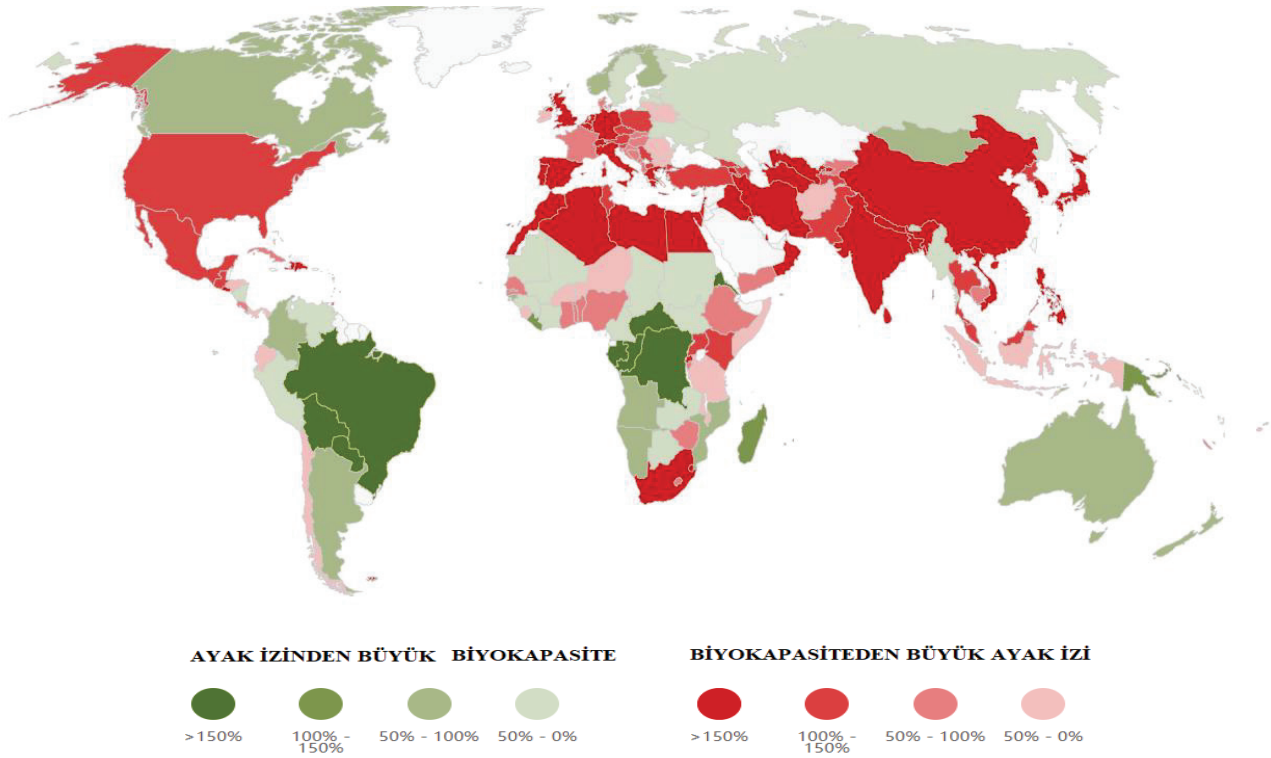
İzi hesaplamalarına ilişkin ilgili literatürü özetlemektedir. Bölüm 4, sırasıyla G20 ülkelerinin kişi başına düşen Ekolojik Ayak İzleri'nin hesaplanmasında kullanılan CRITIC ve VIKOR yöntemlerinin adımlarını ve yöntemlerin G20 ülkelerinin veri seti üzerinde uygulanmasını sunmaktadır. Elde edilen analiz sonuçlarına yine bu bölümde değinilmiştir. Ardından Bölüm 5, çalışmayı sonlandırmaktadır.

## 2.1. Ekolojik Ayak İzi Kavramları

*Küresel hektar (global hectares-gha)*, Ekolojik Ayak İzi ve biyokapasite hesaplamalarında kullanılan ölçü birimidir. Verimlilik ağırlıklı, biyolojik olarak üretken hektarlar, araştırmacıların hem Dünya'nın (veya bir bölgenin) biyokapasitesini hem de bu kapasiteye olan talebi (Ekolojik Ayak İzi) raporlamasına imkân tanımaktadır. Bir başka deyişle küresel hektar, belirli bir yıl için dünya ortalamasında biyolojik verimliliğe sahip bir hektarlık verimli araziye temsil etmektedir. Ekolojik Ayak İzi hesaplanırken arz tarafı, bir şehir, bölge veya ulusun biyokapasitesini yani ekolojik varlıklarının (orman arazileri, otlaklar, tarım arazileri, balıkçılık alanları ve imar arazileri dâhil) üretkenliğini temsil etmektedir. Talep tarafında ise Ekolojik Ayak İzi, belirli bir nüfusun tükettiği doğal kaynakları ve hizmetleri üretmek için ihtiyaç duyduğu ekolojik varlıkları (bitkisel gıda ve lif ürünleri, hayvancılık ve balık ürünleri, kereste ve diğer orman ürünleri, kentsel altyapı için alan ve fosil yakıtlardan kaynaklanan CO<sub>2</sub> emisyonlarını soğurmak için ormanlar dâhil) ölçmektedir (WWF Report, 2016).

*Biyokapasite*, ekosistemlerin, insanların bu yüzeylerden talep ettiklerini yeniden üretme kapasitesi şeklinde tanımlanabilir. Belirli bir yüzeyin biyokapasitesi, güneş enerjisiyle yapılan fotosentez sayesinde insanların talep ettiklerini yeniden üretme yeteneğini temsil etmektedir. Biyokapasite, bu nedenle, mevcut yönetim planları ve çıkarma teknolojileri altında, insanların kullandığı biyolojik malzemeleri üretme ve insanlar tarafından üretilen atık malzemeleri soğurma kapasitesidir. Bir alanın biyokapasitesi gerçek fiziksel alan büyüklüğünün, verim faktörü ve uygun eşdeğerlik faktörü ile çarpılmasıyla hesaplanır. Biyokapasite genellikle küresel hektar cinsinden ifade edilir (<https://www.footprintnetwork.org/resources/glossary/>).

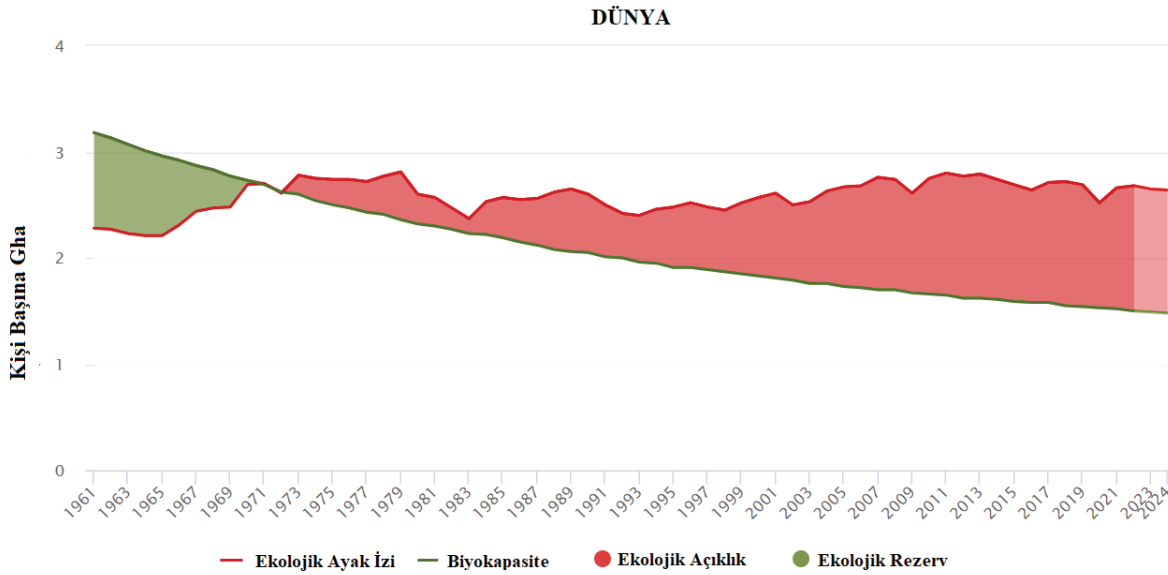
*Ekolojik açıklık*, bir bölge veya ülkenin biyokapasitesi ile Ekolojik Ayak İzi arasındaki farkı ifade etmektedir. Ekolojik açık, bir nüfusun Ayak İzi, o nüfusun kullanabileceği alanın biyolojik kapasitesini aştığında ortaya çıkmaktadır. Tersine bir bölgenin biyolojik kapasitesi nüfusunun Ayak İzini aştığında, *ekolojik rezerv* oluşmaktadır. Bölgesel veya ulusal olarak ekolojik açık söz konusu olduğunda bu durum, bölgenin ticaret yoluyla biyolojik kapasite ithal ettiği veya bölgesel ekolojik varlıkları tasfiye ettiği ya da atmosfer gibi küresel ortak alanlara atık saldırdığı anlamına gelmektedir. Ulusal ölçekten farklı olarak küresel ekolojik açık, ticaret yoluyla telafi edilemez ve bu nedenle tanım gereği aşım ile eş değer kabul edilmektedir (<https://www.footprintnetwork.org/resources/glossary/>). Ülkelerin ekolojik rezerv ve açıklık durumları Şekil 1'de gösterilmektedir.



**Şekil 1.** Dünyada ekolojik rezervler ve açıklar (Kaynak: <https://data.footprintnetwork.org/>)

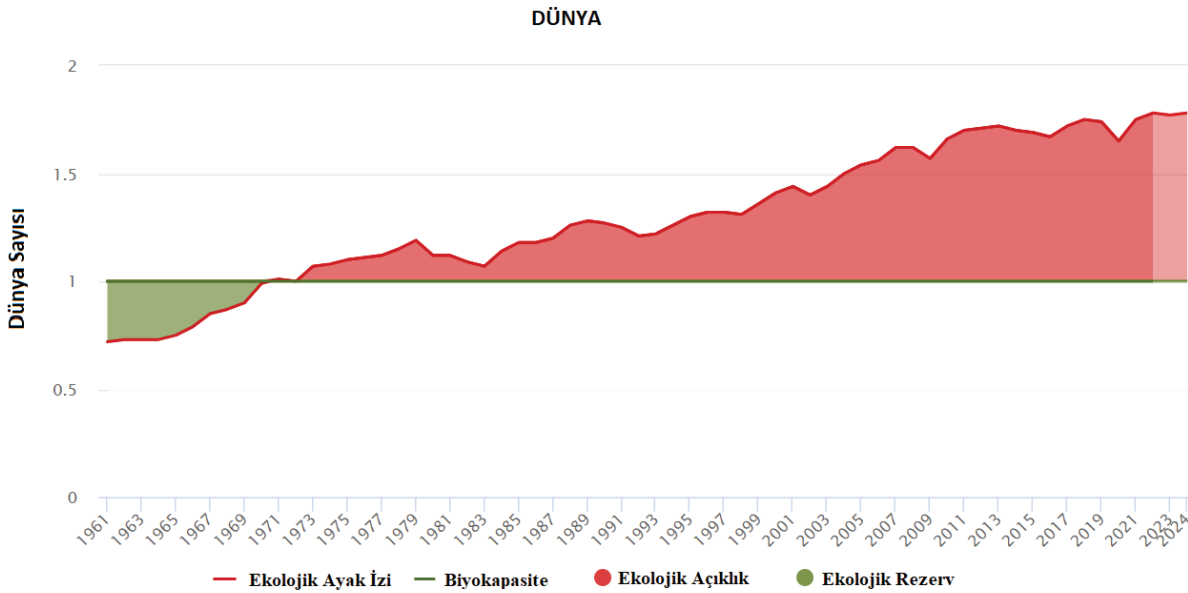
Dünya üzerinde en yüksek biyokapasite rezervine sahip ülkeler arasında, Gabon Cumhuriyeti, Kongo Cumhuriyeti, Bolivya, Orta Afrika Cumhuriyeti ve Paraguay yer almaktadır. Öte yandan Singapur biyokapasite açıklığı açısından açık ara önde yer almaktadır. Singapur'u, Barbados, İsrail, Bahreyn Krallığı ve Katar izlemektedir (<https://data.footprintnetwork.org/>). Singapur'un biyokapasite açıklığının çok yüksek olmasının temel nedeni biyokapasite oluşturan tarım ve orman arazisi alanlarının çok az olması ile yüksek gelir düzeyi ve üretime sahip olmasıdır.

1970'lerin başında, insanlık önemli bir ekolojik eşiği aşmış bulunmaktadır yani doğaya olan toplam talep, biyosferin yenileyebileceği miktarı geçmiştir. Bugün halen, nüfus artmaya devam ederken ve kaynaklar azalırken, ekolojik varlıklarımız artan talep ve iklim değişikliğinden kaynaklanan baskılarla karşı karşıya kalmaktadır (WWF Report, 2016). 1961-2022 yılları arasında dünyada kişi başına düşen küresel hektar cinsinden biyokapasite ve Ekolojik Ayak İzi Şekil 2'de sunulmuştur. Şekilde 2023 ve 2024 yılları, tahmin edilen değerleri temsil etmektedir.



**Şekil 2.** Yıllar itibariyle kişi başına küresel hektar cinsinden biyokapasite ve Ekolojik Ayak İzi (Kaynak: <https://data.footprintnetwork.org>)

Şekil 2 incelendiğinde, 1970’li yıllardan itibaren kişi başına Ekolojik Ayak İzi biyokapasiteyi aştığı için ekolojik açıklık oluştuğu görülmektedir. Şekil 3’te verilen grafik ise insan faaliyetlerinin doğa üzerindeki baskısını gezegen ölçeğinde çarpıcı bir biçimde ortaya koymaktadır.



**Şekil 3.** Yıllar itibariyle ekolojik açıklık ve rezervin dünya sayısı cinsinden gösterimi (Kaynak: <https://data.footprintnetwork.org>)

Şekil 3’e göre, 2022 yılı itibariyle dünya genelinde insanlığın yaşamını sürdürülebilir bir biçimde devam ettirebilmesi için 1,78 dünyaya ihtiyaç duyulmaktadır. Yani şekil insanlığın mevcut üretim ve tüketim düzeylerinin, doğanın sunduğu kaynakların ve kendini yenileme kapasitesinin %78 üzerinde olduğunu göstermektedir ve bu durumun sürdürülebilir olmadığı aşikârdır.

Yukarıda sunulan şekillerden de anlaşılacağı üzere Brundtland Raporu’nda (1987) yer alan ve günümüze kadar kabul gören sürdürülebilir kalkınmanın “bugünün ihtiyaçlarını gelecek nesillerin ihtiyaçlarını karşılama yeteneklerinden ödün vermeden karşılamak” şeklindeki tanımına uymayan

günümüzün üretim ve tüketim alışkanlıkları; nesiller arası adalet, ekonomik sürdürülebilirlik ve toplumsal refahın zarar görmesine neden olmaktadır.

Diğer bir taraftan *Dünya Ekolojik Aşım Günü (Earth Ecological Overshoot Day)* kavramı ise bir nüfusun ekosistemden talep ettiği kaynaklar, o ekosistemin talep edilen kaynakları yenileme kapasitesini aştığında ortaya çıkmaktadır. Aşırı tüketim, ekolojik varlıkların azalmasına ve atmosferde karbon atığının birikmesine neden olmaktadır. Dünya ekolojik aşım günü, belirli bir yılda insanlığın doğaya olan talebinin, Dünya'nın o yıl boyunca yenileyebileceği miktarı aştığı tarihi işaret etmektedir (WWF Report, 2016). 2025 yılında ekolojik aşım günü 24 Temmuz olarak belirlenmiştir. Yani Dünya 2025 yılında temmuz ayı itibariyle dünyanın kaynaklarından kendini yenileyebileceği kadarını tüketmiş, 24 Temmuz tarihinden sonraki yılın geri kalan kısmında ise doğanın sınırlarının ötesinde bir bakıma açık hesaptan tüketme dönemi başlamıştır. Bu durum, toprak verimliliğinin azalması, biyolojik çeşitlilik kaybı ve karbon birikimi gibi uzun vadeli çevresel sorunları tetiklemektedir. 2000 yılında dünya ekolojik aşım günü eylül ayında gerçekleşirken 2025 yılında bu tarih temmuz ayına kadar gerilemiştir.

## 2.2. Ekolojik Ayak İzinin Bileşenleri

Yarım asırdan fazla bir süredir, Ekolojik Ayak İzi'nin en büyük ve en hızlı büyüyen bileşeni karbon olmuştur (WWF Report, 2016). Küresel düzeyde ülkelerin Ekolojik Ayak İzi hesaplanmasında kabul edilen göstergelerden ilki, fosil yakıt tüketimi, CO<sub>2</sub> emisyonları ve elektrik üretim karması verilerinden oluşan karbon ayak izidir (carbon footprint). Karbon ayak izi, fosil yakıt kullanımıyla ilişkili CO<sub>2</sub> emisyonlarını ölçmektedir. Ekolojik Ayak İzi hesaplamalarında bu miktarlar, CO<sub>2</sub>'yi soğurmak için gerekli olan biyolojik olarak üretken alanlara dönüştürülmektedir. Karbon ayak izi, biyolojik olarak üretken alanların rekabetçi kullanımı olduğu için Ekolojik Ayak İzi'ne eklenmektedir, çünkü atmosferdeki CO<sub>2</sub> konsantrasyonlarının artması ekolojik borcun birikmesi anlamına gelmektedir. Birçok karbon ayak izi değerlendirmesi, bu miktarı onu tutmak için gereken alana dönüştürmeden sonuçları yıllık ton CO<sub>2</sub> emisyonu olarak ifade etmektedir (<https://www.footprintnetwork.org/resources/glossary/>).

Ekonomide para neyi ifade ediyorsa, Ekolojik Ayak İzi hesaplanırken de biyolojik olarak üretken yüzeyler onu ifade etmektedir (Wackernagel ve Beyers, 2019). 2023 yılı itibariyle Dünya'nın yaklaşık 11,9 milyar hektarlık biyolojik olarak verimli arazisi ve su alanları beş farklı türe ayrılmıştır. Altı Ayak İzi talep türünü destekleyen biyokapasite için beş alan türü aşağıda açıklanmıştır (<https://www.footprintnetwork.org/resources/glossary/>):

Tarım arazisi (cropland): Tarım arazisi, tüm arazi kullanım türleri arasında biyolojik üretkenliği en yüksek olanıdır ve insan tüketimi için gıda ve lif, hayvan yemi, yağ bitkileri ve kauçuk üretimi için kullanılan alanlardan oluşmaktadır. Küresel olarak tutarlı veri setlerinin bulunmaması nedeniyle, mevcut tarım arazisi ayak izi hesaplamaları, tarım tekniklerinin veya sürdürülemez tarım uygulamalarının toprağın uzun vadeli bozulmasına ne ölçüde neden olabileceğini henüz dikkate almamaktadır. Tarım arazisi ayak izi, hayvancılık ve su ürünleri yem karışımlarına ayrılan mahsul ürünlerini ve lif ve malzeme için kullanılanları içermektedir.

Orman arazileri (forest land): İki farklı şekilde ele alınmaktadır. Orman ürünü (forest product) ayak izi, bir ülkenin yıllık olarak tükettiği kereste, kâğıt hamuru, kereste ürünleri ve yakacak odun miktarına göre hesaplanmaktadır. Ayrıca, fosil yakıtların yakılmasıyla ortaya çıkan CO<sub>2</sub> emisyonlarını temsil eden karbon ayak izini de bünyesinde barındırmaktadır. Karbon ayak izi, ithal mallarda bulunan karbonu da içermektedir. Kavram bu karbon emisyonlarını tutmak için gerekli alanla temsil edilmektedir. Ekolojik Ayak İzi'nin karbon ayak izi bileşeni, CO<sub>2</sub> emisyonlarını

soğurmak için gereken orman arazisi miktarı olarak hesaplanmaktadır. Şu anda karbon ayak izi, insanlığın Ekolojik Ayak İzi'nin en önemli kısmını oluşturmaktadır.

**Otlak arazisi (grazing land):** Et, süt, deri ve yün ürünleri için hayvancılık yapmak amacıyla kullanılan alanı ifade etmektedir. Otlak arazisi ayak izi, bir ülkede mevcut olan hayvan yemi miktarı ile o yıl tüm hayvanlar için gerekli olan yem miktarı karşılaştırılarak hesaplanmaktadır; yem talebinin geri kalan kısmının otlak arazisinden karşılandığı varsayılmaktadır.

**Balıkçılık alanları (fishing grounds):** Balıkçılık alanlarının ayak izi, çeşitli balık türleri için maksimum sürdürülebilir av miktarı tahminlerine göre hesaplanmaktadır. Bu sürdürülebilir av miktarı tahminleri, çeşitli türlerin trofik seviyelerine göre eşdeğer birincil üretim kütesine dönüştürülmektedir. Maksimum hasat edilebilir birincil üretim tahmini daha sonra dünyanın kıta sahanlığı alanları arasında bölüştürülmektedir. Yakalanan ve su ürünleri yem karışımlarında kullanılan balıklar da hesaplama dâhil edilmektedir.

**İmar arazileri (built-up land):** Bu arazi ayak izi, ulaşım, konut, endüstriyel yapılar ve hidroelektrik barajları gibi insan altyapısının kapladığı arazi alanına göre hesaplanmaktadır. İmar arazisi, daha önce tarım arazisi olan alanları kaplayabilmektedir.

Dünya üzerindeki bütün ülkeler Ekolojik Ayak İzi'nin altı bileşenini ayrı ayrı önemseydiğinde, ekolojik sistemdeki tüm kaynakları daha doğru kullanarak gelecekleri güvence altına alabileceklerdir (Durkaya, 2022).

### 3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Ekosisteme verilen zararın boyutunu belirleyerek çevresel sorunların en aza indirilmesi konusunda farkındalık oluşturmada önemli bir rol oynayan Ekolojik Ayak İzi, çevresel etkinin bir göstergesi olarak son yıllarda önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir (Durkaya ve Kaya, 2024). Ekolojik Ayak İzi kısaca bir kişinin yaşam tarzı, tüketim alışkanlıkları ve faaliyetlerinin çevreye verdiği zararın ölçüsüdür. Ekolojik Ayak İzi kavramı, 1990'ların başında ortaya atılmış ve o günden bu yana geliştirilmiştir. Bu kavram, önemli araştırma çabalarına yol açmış ve politika yapıcıların ilgisini her geçen gün daha fazla çekmiştir. Nispeten yeni bir araştırma konusu olduğu için, uygulama kapsamı ve yorumlama konusuna dikkat edilmesi gerekmektedir. Schaefer, vd. (2006) çalışmalarında Ekolojik Ayak İzi kavramı ve Ekolojik Ayak İzi/Biyokapasite hesaplama aracı hakkında eleştirel bir değerlendirme sunmuşlardır. Öte yandan Moran vd. (2008) 0,8'den az olmayan bir İnsani Gelişim İndeksi (Human Development Index/HDI) ile kişi başına düşen Ekolojik Ayak İzi'nin küresel olarak mevcut kişi başına biyokapasiteden az olmasının, küresel olarak tekrarlanabilir sürdürülebilir kalkınma için asgari gereklilikler olduğu sonucuna varmışlardır.

Yang ve Meng (2019), çalışmalarında 2000 ile 2017 yılları arasında Çin'de ve dünyada Ekolojik Ayak İzi konusundaki makalelerin odak noktalarını ve sınırlarını karşılaştırmıştır. Ulucak ve Erdoğan (2020), Web of Science (WOS) veri tabanında Ekolojik Ayak İzi ile ilgili makalelerin bibliyometrik analizini yapmışlardır. Bibliyometrik analiz yöntemini benimseyen ve Ekolojik Ayak İzi'ni konu edinen çalışmalardan bir diğeri Durkaya ve Kaya tarafından 2024 yılında yapılmıştır. Çalışmada, 2010-2021 yılları arasında yapılmış olan WOS veri tabanında taranan çalışmalar incelenmiş ve yıllık ve ülke bazında yayın sayısı, en üretken yazar ve dergiler, yazarların h-İndeksleri, en çok atıf alan yazar ve dergiler, en çok atıf alan referansların dağılımı ve bu değişkenler arasındaki bazı ilişkiler temelinde analizler gerçekleştirilmiştir.

Lin vd., (2018) Ulusal Ekolojik Ayak İzi Hesapları'nın gelişimini incelemiş ve 2012 yılından bu yana yapılan önemli metodolojik ve veri iyileştirmelerini açıklamış olup bu iyileştirmelerin tüm ülkelerin ve dünyanın bir bütün olarak Ekolojik Ayak İzi ve biyokapasitesi üzerindeki etkisini nicel olarak



ölçmeye çalışmışlardır. Analizler, geliştirilmiş yönetim uygulamalarının ve artan tarımsal verimliliğin 1961'den bu yana Dünya'nın biyokapasitesinin istikrarlı bir şekilde artmasına yardımcı olmasına karşın farklı hesaplama metodolojilerinde insanlığın -özellikle de toplam ve kişi başına Ekolojik Ayak İzi'nin diğer tüm bölgelerden daha hızlı arttığı Asya kıtasının- Ekolojik Ayak İzi'nin küresel biyokapasiteden daha hızlı bir şekilde artmaya devam ettiği sonucunu ortaya koymuştur.

Zakari vd. (2012) çalışmalarında 13 farklı ülkenin Ekolojik Ayak İzi, yüz ölçümü ve nüfusu arasındaki ilişkiyi, önerilen bir formül ve anket çalışması yoluyla analiz etmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, Ekolojik Ayak İzi ile incelenen ülkelerin yüzölçümü arasında önemli bir doğrusal ilişki olmadığı tespit edilmiştir.

Bu çalışmada G20 ülkelerinin 2022 yılındaki kişi başına Ekolojik Ayak İzleri, Çok Kriterli Karar Verme yaklaşımı (ÇKKV) ile analiz edilmiştir. Analiz için literatürde kabul gören CRITIC ve VIKOR yöntemleri kullanılmıştır. Öncelikli olarak dikkate alınan kriterlerin ağırlıkları 4.1 başlığında adımları verilen CRITIC yönteminin aşamaları takip edilerek elde edilmiş, sonrasında ise 4.2 başlığı altında aşamaları detaylandırılan VIKOR yöntemi ile ülkelerin kişi başına düşen Ekolojik Ayak İzi açısından performans değerlendirmeleri yapılmıştır.

## 4. G20 ÜLKELERİNİN KİŞİ BAŞINA EKOLOJİK AYAK İZLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

### 4.1. CRITIC Yöntemi

CRITIC, kriterler arası korelasyon kullanılarak kriterlerin ağırlıklandırılması yöntemidir. Diakoulaki vd. (1995) tarafından ortaya atılan yöntem değerlendirme kriterlerinde yer alan tüm bilgileri çıkartmak için karar matrisinin analitik incelenmesine dayanmaktadır. Yöntemin adımları aşağıda verilmiştir (Ecer, 2020).

Adım 1: Karar matrisinin oluşturulması; X karar matrisi ilgili verilerden oluşur, sayısal değerlerdir.

$$X = [x_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}; i = 1, 2 \dots m \quad j = 1, \dots n \quad (1)$$

Adım 2: Standartlaştırma; max-min. lineer normalizasyon yardımıyla karar matrisi elemanları normalize edilir. Bu amaçla Eşitlik (2) fayda kriterleri için Eşitlik (3) maliyet kriterleri için kullanılır.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (2)$$

$$r_{ij} = \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (3)$$

Adım 3: Korelasyon katsayısının hesaplanması; bu adımda Eşitlik (4) kullanılarak korelasyon katsayısı hesaplanır.

$$\rho_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_j)(r_{ik} - \bar{r}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_j)^2 \sum_{i=1}^m (r_{ik} - \bar{r}_k)^2}}; j \text{ ve } k: 1, 2 \dots n \quad (4)$$

Adım 4:  $C_j$  değerinin ve standart sapmanın hesaplanması; Eşitlik (5) kullanılarak  $C_j$  değeri, Eşitlik (6) kullanılarak standart sapma değeri hesaplanır.

$$C_j = \sigma_j \sum_k^n (1 - \rho_{jk}) \quad (5)$$

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_j)^2}{m}} \quad (6)$$

Adım 5: Önem ağırlıklarının hesaplanması; son adımda kriterlerin önem ağırlıkları Eşitlik (7) ile elde edilir.

$$W_j = \frac{c_j}{\sum_{k=1}^n c_k} ; \sum_{j=1}^n W_j = 1 \quad (7)$$

## 4.2. VIKOR Yöntemi

VIKOR Yöntemi, Opricovic tarafından literatüre kazandırılmış uzaklık temelli bir Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemidir. Yöntem birbirleri ile çelişen çoklu kriterlere sahip durumlarda uzlaşmacı ya da uzlaşık bir çözüme ulaşarak mevcut alternatifler için sıralama elde etmektedir (Opricovic, Tzeng, 2008; Ecer, 2020). Yöntemin adımları aşağıda verilmiştir (Ecer, 2020).

Adım 1: En iyi ve en kötü değerlerin belirlenmesi; her bir kriter için en iyi  $f_j^*$  ve en kötü  $f_j^-$  değerleri belirlenir.

$$f_j^* = \max f_{ij} \quad \text{ve} \quad f_j^- = \min f_{ij} \text{ değerleridir.} \quad (8)$$

Adım 2:  $S_i$  ve  $R_i$  değerlerinin elde edilmesi;  $W_j$  kriter ağırlıklarını göstermek üzere her bir alternatif için  $S_i$  ve  $R_i$  değerleri hesaplanır.

$$S_i = \sum_{j=1}^n W_j \cdot (f_j^* - f_{ij}) / (f_j^* - f_j^-) \quad (9)$$

$$R_i = \max_j W_j \cdot (f_j^* - f_{ij}) / (f_j^* - f_j^-) \quad (10)$$

Adım 3:  $Q_i$  değerinin bulunması; her bir alternatif için  $Q_i$  değeri hesaplanır.

$$Q_i = v(S_i - S^*) / (S^- - S^*) + (1 - v)(R_i - R^*) / (R^- - R^*) \quad (11)$$

Formülde;

$$S^* = \min S_i \quad S^- = \max S_i, R^* = \min R_i \quad R^- = \max R_i \text{ değerleridir.} \quad (12)$$

$v$  değeri, maksimum grup faydası ağırlığı değeridir, genellikle  $v$  değeri 0,5 olarak alınır. Genellikle  $v$  değeri 0,5'den büyük ise çoğunluk oyu, eşit ise fikir birliği ya da 0,5'ten küçük ise veto olarak uzlaş sağlanır.

Adım 4: Sıralamanın elde edilmesi; S, R, Q değerlerine göre alternatifler azalan sıraya göre sıralanır. En iyi alternatifin seçilmesi için aşağıdaki iki koşul sağlanmalıdır.

Koşul 1: Kabul edilebilir avantaj: En iyi ve en iyiye yakın seçenek arasında belirgin bir fark olduğunun kanıtlanmasını içeren koşuldur.

$$Q(A^2) - Q(A^1) \geq DQ \quad (13)$$

( $A^1$ ), en iyi alternatifi ( $A^2$ ) ise ikinci en iyi alternatifi temsil etmektedir.  $DQ$  değeri aşağıdaki formül ile hesaplanır;

$$DQ = 1/(m - 1), m \text{ alternatif sayısıdır.} \quad (14)$$

Koşul 2: Kabul edilebilir istikrar: En iyi Q değerine sahip alternatifin aynı zamanda S ya da R değerlerinin sıralamasında en az bir tanesinde en iyi alternatif olmasıdır.

Bu iki koşuldan biri sağlanmıyorsa;

Eğer Koşul 2 sağlanmıyorsa,  $A^1, A^2$  alternatifleri çözüm olarak kabul edilir, şayet Koşul 1 sağlanmıyorsa  $A^1, A^2, \dots, A^m$  alternatifleri için;

$$Q(A^m) - Q(A^1) \leq DQ \quad (15)$$

belirlenir.  $Q$  değerlerine göre sıralanan en iyi alternatif minimum  $Q$  değerine sahip alternatiflerden birisidir.

### 4.3. Uygulama

#### 4.3.1. CRITIC Yönteminden Elde Edilen Sonuçlar

Bu bölümünde, G20 Ülkeleri için kişi başı Ekolojik Ayak İzi (<https://data.footprintnetwork.org/>) verileri temel alınmıştır. Veri seti mevcut olan 18 adet G20 Ülkesine ait 2022 yılı verileri kullanılarak CRITIC yönteminden faydalanmak suretiyle Tablo 1'deki karar matrisi oluşturulmuştur. Ekolojik Ayak İzi hesaplamasında dikkate alınan altı kriter; İmar Arazisi (E1), Karbon (E2), Tarım Arazisi (E3), Balıkçılık Alanları (E4), Orman Ürünleri (E5) ve Otlak Arazisi (E6) şeklindedir ve bu kriterlere ait ağırlık değerleri hesaplanmıştır.

**Tablo 1.** Karar Matrisi

| Ülke             | E1   | E2   | E3   | E4   | E5   | E6   |
|------------------|------|------|------|------|------|------|
| Arjantin         | 0,09 | 1,23 | 1,06 | 0,1  | 0,3  | 0,44 |
| Brezilya         | 0,09 | 0,78 | 0,42 | 0,06 | 0,44 | 0,62 |
| Kanada           | 0,08 | 4,87 | 1,56 | 0,11 | 1,49 | 0,25 |
| Fransa           | 0,19 | 2,75 | 1,06 | 0,24 | 0,54 | 0,28 |
| Almanya          | 0,20 | 2,88 | 0,8  | 0,06 | 0,48 | 0,18 |
| Hindistan        | 0,04 | 0,7  | 0,23 | 0,02 | 0,11 | 0,01 |
| Endonezya        | 0,05 | 0,83 | 0,48 | 0,23 | 0,17 | 0,04 |
| İtalya           | 0,08 | 2,64 | 0,72 | 0,22 | 0,55 | 0,34 |
| Japonya          | 0,06 | 3,21 | 0,41 | 0,23 | 0,23 | 0,13 |
| Güney Kore       | 0,05 | 4,01 | 0,66 | 0,44 | 0,2  | 0,23 |
| Meksika          | 0,05 | 1,41 | 0,54 | 0,09 | 0,28 | 0,21 |
| Rusya            | 0,07 | 3,76 | 1,22 | 0,25 | 0,71 | 0,06 |
| Güney Afrika     | 0,03 | 2,24 | 0,43 | 0,06 | 0,24 | 0,04 |
| Birleşik Krallık | 0,16 | 2,43 | 0,72 | 0,08 | 0,38 | 0,24 |
| ABD              | 0,06 | 5,15 | 1,34 | 0,12 | 0,93 | 0,28 |
| Çin              | 0,07 | 2,71 | 0,41 | 0,07 | 0,21 | 0,12 |
| Türkiye          | 0,05 | 2,02 | 0,90 | 0,05 | 0,37 | 0,10 |
| Avrupa (AB)      | 0,13 | 2,82 | 0,92 | 0,18 | 0,62 | 0,20 |

İlk olarak max-min. lineer normalizasyon yardımıyla karar matrisi elemanları normalize edilmiştir. Her bir kriter çevresel baskıyı temsil etmeleri nedeniyle maliyet kriteri olarak değerlendirilmiştir. Eşitlik (3) kullanılarak karar matrisi normalize edilmiş ve elde edilen normalize karar matrisi Tablo 2'de sunulmuştur.

**Tablo 2.** Normalize Karar Matrisi

| Ülke     | E1     | E2     | E3     | E4     | E5     | E6     |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Arjantin | 0,6471 | 0,8809 | 0,3759 | 0,8095 | 0,8623 | 0,2951 |
| Brezilya | 0,6471 | 0,9820 | 0,8571 | 0,9048 | 0,7609 | 0,0000 |
| Kanada   | 0,7059 | 0,0629 | 0,0000 | 0,7857 | 0,0000 | 0,6066 |
| Fransa   | 0,0588 | 0,5393 | 0,3759 | 0,4762 | 0,6884 | 0,5574 |

|                  |        |        |        |        |        |        |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Almanya          | 0,0000 | 0,5101 | 0,5714 | 0,9048 | 0,7319 | 0,7213 |
| Hindistan        | 0,9412 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 |
| Endonezya        | 0,8824 | 0,9708 | 0,8120 | 0,5000 | 0,9565 | 0,9508 |
| İtalya           | 0,7059 | 0,5640 | 0,6316 | 0,5238 | 0,6812 | 0,4590 |
| Japonya          | 0,8235 | 0,4360 | 0,8647 | 0,5000 | 0,9130 | 0,8033 |
| Güney Kore       | 0,8824 | 0,2562 | 0,6767 | 0,0000 | 0,9348 | 0,6393 |
| Meksika          | 0,8824 | 0,8404 | 0,7669 | 0,8333 | 0,8768 | 0,6721 |
| Rusya            | 0,7647 | 0,3124 | 0,2556 | 0,4524 | 0,5652 | 0,9180 |
| Güney Afrika     | 1,0000 | 0,6539 | 0,8496 | 0,9048 | 0,9058 | 0,9508 |
| Birleşik Krallık | 0,2353 | 0,6112 | 0,6316 | 0,8571 | 0,8043 | 0,6230 |
| ABD              | 0,8235 | 0,0000 | 0,1654 | 0,7619 | 0,4058 | 0,5574 |
| Çin              | 0,5882 | 0,8899 | 0,7368 | 0,6429 | 0,8406 | 0,7869 |
| Türkiye          | 0,5294 | 0,7685 | 0,5564 | 0,5714 | 0,7246 | 0,7541 |
| Avrupa (AB)      | 0,1176 | 0,5876 | 0,6015 | 0,7857 | 0,7681 | 0,6557 |

CRITIC yönteminin bu aşamasında her bir kriter için Eşitlik (4) kullanılarak kriterler arası ilişkiyi gösteren korelasyon değeri hesaplanmış ve ardından da Eşitlik (5) kullanılarak her bir kriter için bilgi miktarını ifade eden  $C_j$  değeri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir. Her bir kriter için ağırlık skorları  $W_j$  değeri, Eşitlik (7) kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 3'te verilmiştir.

**Tablo 3.**  $C_j$  ve  $W_j$  değerleri

|       | E1            | E2            | E3            | E4            | E5            | E6            |
|-------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $C_j$ | 1,2470        | 0,9516        | 0,7919        | 1,1536        | 0,7364        | 1,0884        |
| $W_j$ | <b>0,2089</b> | <b>0,1594</b> | <b>0,1327</b> | <b>0,1933</b> | <b>0,1234</b> | <b>0,1823</b> |

Tablo 3'te yer alan değerlere göre en yüksek ağırlığa sahip kriter E1-İmar Arazisi (yapılaşmış alan) olmuştur. İkinci en önemli kriter, E4-Balıkçılık Alanları olmuştur. En düşük ağırlığa sahip kriter ise E5-Orman Ürünleri olarak belirlenmiştir.

Genel olarak, elde edilen CRITIC ağırlıklarına göre Ekolojik Ayak İzi'nin değerlendirilmesinde; yalnızca karbon emisyonlarına odaklanılmamalı aynı zamanda yapılaşmış arazilere, balıkçılık alanlarına, otlak arazilerine de önem vermek gerekmektedir. Ülkelerin sürdürülebilirlik politikaları sadece emisyon azaltıcı yöntemler üzerine değil, doğal kaynak kullanımını da içerecek şekilde bütüncül bir yapıda değerlendirilmelidir.

#### 4.3.2. VIKOR Yönteminden Elde Edilen Sonuçlar

CRITIC yöntemi ile hesaplanmış olan ağırlık değerleri bu bölümde VIKOR yöntemine dâhil edilmiştir. İlk olarak VIKOR yöntemi için Tablo 1'deki karar matrisi kullanılmıştır. Her bir kriter için Eşitlik (8) kullanılarak en iyi ve en kötü değerler belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir.

**Tablo 4.** En iyi ve en kötü değer

|         | E1   | E2   | E3   | E4   | E5   | E6   |
|---------|------|------|------|------|------|------|
| $f_j^*$ | 0,03 | 0,7  | 0,23 | 0,02 | 0,11 | 0,01 |
| $f_j^-$ | 0,2  | 5,15 | 1,56 | 0,44 | 1,49 | 0,62 |

Sonraki adım olarak CRITIC sonuçları ile elde edilen ağırlık değerleri de eklenerek Eşitlik (9) ve (10)'daki hesaplamalardan faydalanılmış ve  $S_i$  ve  $R_i$  değerleri elde edilmiştir. Hesaplama sonuçları Tablo 5'te verilmiştir.

**Tablo 5.**  $S_i$  ve  $R_i$  değerleri

| Ülkeler      | $S_i$  | $R_i$  |
|--------------|--------|--------|
| Arjantin     | 0,3578 | 0,1285 |
| Brezilya     | 0,3258 | 0,1823 |
| Kanada       | 0,5801 | 0,1494 |
| Fransa       | 0,5732 | 0,1966 |
| Almanya      | 0,4462 | 0,2089 |
| Hindistan    | 0,0123 | 0,0123 |
| Endonezya    | 0,1652 | 0,0967 |
| İtalya       | 0,4098 | 0,0986 |
| Japonya      | 0,2880 | 0,0967 |
| Güney Kore   | 0,4531 | 0,1933 |
| Meksika      | 0,1881 | 0,0598 |
| Rusya        | 0,4320 | 0,1096 |
| Güney Afrika | 0,1141 | 0,0552 |
| Birleşik     | 0,3911 | 0,1597 |
| ABD          | 0,5071 | 0,1594 |
| Çin          | 0,2039 | 0,0720 |
| Türkiye      | 0,2027 | 0,0668 |
| Avrupa (AB)  | 0,4437 | 0,1229 |

Sonraki adım olarak her bir alternatif için  $Q_i$  değeri Eşitlik (11) kullanılarak hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 6'da verilmiştir.

**Tablo 6.**  $Q_i$  değeri

| Ülkeler          | $Q_i$  |
|------------------|--------|
| Hindistan        | 0,0000 |
| Güney Afrika     | 0,1987 |
| Meksika          | 0,2756 |
| Türkiye          | 0,3064 |
| Çin              | 0,3206 |
| Endonezya        | 0,3492 |
| Japonya          | 0,4573 |
| İtalya           | 0,5696 |
| Arjantin         | 0,5999 |
| Rusya            | 0,6171 |
| Avrupa (AB)      | 0,6612 |
| Brezilya         | 0,7084 |
| Birleşik Krallık | 0,7086 |
| ABD              | 0,8098 |
| Güney Kore       | 0,8486 |
| Kanada           | 0,8486 |
| Almanya          | 0,8821 |
| Fransa           | 0,9628 |

Son adım olarak en iyi alternatifin seçilmesi için iki koşulun sağlanması gerekmektedir. Koşul 1 için Eşitlik (13) ve (14)'teki işlemler yapılmış ve sonuçları Tablo 7'de verilmiştir. Koşul 2'ye göre de Hindistan 1. sırada yer almaktadır. Yani Koşul 1 ve Koşul 2 sağlanmaktadır. Uzlaşık sonuç elde edilmiştir.

**Tablo 7.** Koşul Durumları

|             |          |
|-------------|----------|
| Q(A2)       | 0,1987   |
| Q(A1)       | 0,0000   |
| Q(A2)-Q(A1) | 0,1987   |
| DQ          | 0,0588   |
| Koşul 1     | Sağlandı |
| Koşul 2     | Sağlandı |

VIKOR yöntemi ile elde edilen  $Q_i$  değerleri, G20 Ülkeleri arasında kişi başına düşen Ekolojik Ayak İzi açısından belirgin bir performans farklılaşması olduğunu göstermektedir.  $Q_i$  değerinin küçük olması, ülkenin uzlaşık çözüme daha yakın olduğunu göstermektedir. Tablo 6'daki sonuçlara göre ilk sırada Hindistan bulunmaktadır. Hindistan'ı takiben Güney Afrika, üçüncü sırada ise Meksika gelmektedir. Sıralamada en düşük performansa sahip ülkeler ise sırayla; Kanada, Almanya ve Fransa olmuştur.



**Şekil 4.** G20 ülkelerinin CRITIC-VIKOR Yöntemi ile kişi başına Ekolojik Ayak İzi sıralamaları

Dikkate alınan kriterler ve elde edilen kriter ağırlıkları çerçevesinde gerçekleştirilen analiz, kişi başına düşen Ekolojik Ayak İzi açısından doğa üzerinde en fazla baskı oluşturan ülkenin Fransa iken en az baskı oluşturan ülkenin ise Hindistan olduğunu ortaya koymuştur (Şekil 4). Değerlendirmeler sonucu, Hindistan'ın kişi başına Ekolojik Ayak İzi performansının yüksek olmasının temel nedenleri arasında yüksek nüfus yoğunluğu yer almaktadır. Bununla birlikte gelişmiş ülkelere nazaran sanayileşmesinin düşük olması ve kişi başına düşen gelir miktarının sınırlı olmasının da sonuç üzerinde etkin olduğu düşünülmektedir. Öte yandan Fransa'nın yüksek tüketim düzeyi ve kişi başına gelir seviyesinin yüksekliği, sonucun bu doğrultuda şekillenmesinde etkili olabilir.

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada G20 ülkelerinin Ekolojik Ayak İzi performanslarının kapsamlı bir değerlendirilmesini yapmak üzere Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yaklaşımı kullanılmıştır. Bu bağlamda, öncelikle ülkelerin kişi başına düşen Ekolojik Ayak İzi hesaplamasında dikkate alınan altı adet kriterin (İmar Arazisi (E1), Karbon (E2), Tarım Arazisi (E3), Balıkçılık Alanları (E4), Orman Ürünleri (E5) ve

Otlak Arazisi (E6)) ağırlıkları CRITIC yöntemiyle belirlenmiş ve belirlenen kriter ağırlıkları kullanılarak VIKOR yöntemi aracılığıyla veri setine ulaşılabilen 18 adet G20 ülkesinin 2022 yılı için kişi başına düşen Ekolojik Ayak İzi performansları değerlendirilmiştir.

Ülkelerin sürdürülebilir kalkınmaya yönelik politika geliştirmesinde yalnızca karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik önlemler alması alarm veren Dünya'nın sürdürülebilirliğinin sağlanması için yetersiz kalmaktadır. Geliştirilen politikalarda ve iklim değişikliği ile mücadele etmek adına atılan adımlarda; arazi planlaması, kaynak kullanımı ve kentleşme politikalarının da dikkate alınması gerekmektedir. G20 ülkelerinin de doğa üzerindeki etkilerinin azaltılmasında sadece karbon emisyonlarını düşürmeye odaklanması yeterli olmamakta ve daha kapsamlı bütüncül yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Çalışmada, CRITIC yönteminden elde edilen kriter ağırlıkları kullanılarak VIKOR yöntemi ile araştırmaya konu olan 18 adet G20 ülkesinin 2022 yılı için kişi başına çevresel etkileri analiz edilmiştir. VIKOR yöntemi ile gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre; Hindistan (0), Güney Afrika (0,1987) ve Meksika (0,2756) gibi ülkeler, kişi başına düşük ekolojik baskı ile ön plana çıkmıştır. Diğer taraftan, ABD, Kanada, Almanya ve Fransa gibi gelişmiş ekonomiler, kişi başı yüksek çevresel baskı ile sıralamada aşağı sıralarda yer almıştır. Bu sonuç, bu ülkelerin kişi başına daha fazla çevresel baskı oluşturduğuna işaret etmektedir. Gelişmekte olan bir ekonomiye sahip olan Türkiye ise G20 ülkeleri arasında kişi başına düşen Ekolojik Ayak İzi performansı bakımından üst sıralarda yer almıştır.

G20, bir taraftan Çin, Hindistan, Endonezya gibi nüfus yoğunluğu fazla olan ülkeleri bünyesinde barındırırken bir taraftan da ekonomik açıdan gelişmiş (ABD, Japonya, Almanya, Fransa vb.) ve gelişmekte olan (Hindistan, Türkiye, Meksika vb.) ülkeleri kapsamaktadır. Kalkınma seviyeleri, nüfusları ve yapısal düzeydeki farklılıkları göz önünde bulundurulduğunda, G20 bünyesindeki ülkelerin homojen bir yapı sergilemediği görülmektedir. Bu durum, sürdürülebilirlik açısından G20 ülkeleri için tek tipte bir politikanın izlenmesini engellemektedir. Nitekim yüksek gelirli ülkelerde yoğun kentleşme, enerji tüketimi ve doğal kaynak kullanımı Ekolojik Ayak İzi miktarını artırmakta, ülkenin nüfus yoğunluğu faktörü de devreye girdiğinde kişi başına düşen Ekolojik Ayak İzi miktarları ülkeler arasında değişkenlik göstermektedir. Bu bakımdan, sürdürülebilirlik politikalarının farklı gelişmişlik seviyelerine göre ülkelerin dinamiklerini de dikkate alarak geliştirilmesi ve uygulanması gerekmektedir. Diğer taraftan, Ekolojik Ayak İzi bakımından düşük performans sergileyen bir başka ifade ile doğal kaynakların tükenmesinde ve doğanın kapasitesinin aşılmasında daha önemli rol oynayan ülkelerde, çevresel etkiyi artıran uygulamaların çevreci uygulamalara dönüştürülmesi için harekete geçilmesi gerekmektedir.

Bu çalışma, G20 ülkelerinde kişi başına düşen Ekolojik Ayak İzi'nin yönetimine yönelik önemli sonuçlar sunmakla birlikte, sınırlı kriterler ve tek yıllık veri seti (2022 yılı) üzerinden gerçekleştirilmiştir. İlerideki çalışmalarda, daha kapsamlı kriter seti üzerinden farklı ülke ve bölgelerin yıllar itibarıyla Ekolojik Ayak İzi değerlendirmesi yapılarak karşılaştırmalar ve politika çıkarımları yapılabilir. Diğer taraftan farklı ÇKKV yöntemleri ile değerlendirmelerin yapılması da mümkündür.

## KAYNAKÇA

- Diakoulaki, D., Mavrotas, G., & Papayannakis, L. (1995). Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method. *Computers & Operations Research*, 22(7), 763-770.
- Durkaya, F. (2022). Analysis of graduate theses on the topic of ecological footprint, *Journal of Science Mathematics Entrepreneurship and Technology Education*, 5(2), 166–184.
- Durkaya F., Kaya M. (2024). Bibliometric profile of research on ecological footprint. *Environmental Research & Technology*, 7(4), 502–511.
- Ecer, F. (2020) Çok kriterli karar verme geçmişten günümüze kapsamlı bir yaklaşım. Seçkin Yayınevi, Ankara.
- Global Footprint Network, <https://data.footprintnetwork.org/>, Erişim Tarihi: 22.9.2025.
- Global Footprint Network, <https://www.footprintnetwork.org/resources/glossary/>, Erişim Tarihi: 15.11.2025.
- IUCN/UNEP/WWF (1991). *Caring for the earth: a strategy for sustainable living*. Gland, Switzerland.
- Lin, D., Hanscom, L., Murthy, A., Galli, A., Evans, M. vd. (2018), Ecological footprint accounting for countries: updates and results of the national footprint accounts, 2012–2018. *Resources*, 7, 58.
- Moran, D.D., Wackernagel, M., Kitzes, J.A., Goldfinger, S.H., Boutaud, A. (2008). Measuring sustainable development-nation by nation, *Ecological Economics*, 64, 470-474.
- Opricović, S., Tzeng, G.H. (2008). A comparative analysis of the DEA-CCR model and the VIKOR method. *Yugoslav Journal of Operations Research*, 18(2), 187-203.
- Schaefer, F., Luksch, U., Steinbach, N., Cabeça, J., Hanauer, J. (2006). Ecological footprint and biocapacity the world's ability to regenerate resources and absorb waste in a limited time period, *European Communities*, Luxembourg.
- Solarin, S.S., Tiwari, A.K., Bello, M.O. (2019). A multi-country convergence analysis of ecological footprint and its components, *Sustainable Cities and Society*, 46, 101422.
- Wackernagel, M., Beyers, B. (2019). *Ecological footprint: managing our biocapacity budget*, New Society Publishers.
- WCED (1987) *Our common future: report of the world commission on environment and development*. Oxford University Press, Oxford.
- WWF Report, 2016. *Ecological footprint of the russian regions*, edited Pavel A. Boev and Dmitry L. Burenko, WWF-Russia.
- WWF Report, 2002. *Ecological footprints a guide for local authorities*, Bond S., WWF-UK.
- Ulucak, R., Erdoğan, S. (2020). Bibliometric analysis of ecological footprint studies, *International Congress of Energy Economy and Security*, 14-15 November 2020, İstanbul.



Yang, Y., Meng, G. (2019). A bibliometric analysis of comparative research on the evolution of international and Chinese ecological footprint research hotspots and frontiers since 2000, *Ecological Indicators*, 102, 650–665.

Zakari, R., Zolfagharian, S., Nourbakhsh, M., Zin, R.M. vd. (2012). Ecological footprint of different nations, *IACSIT International Journal of Engineering and Technology*, 4 (4), 464-467.



# Bölüm 6

## ELEKTRO-OKSİDASYON PROSESİ İLE İLAÇ ETKEN MADDE GİDERİMİNE GENEL BİR BAKIŞ

*Mahmut SOYLU<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> (Öğr. Gör. Dr.) Iğdır Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu Çevre Sağlığı Programı, ORCID ID:0000-0002-8410-8822

## 1. Giriş

Son yıllarda, insan ve veteriner hekimliğinde kullanılan farmasötik ürünlerin artan tüketimi, bu bileşiklerin ve metabolitlerinin atıksu arıtma tesislerinin (AAT) alıcı ortamları olan nehirlere, göllere ve yeraltı sularına sürekli olarak salınmasına yol açmıştır. İlaç etken maddeleri (İEM), düşük konsantrasyonlarda (ng/L ila µg/L aralığında) bulunmalarına rağmen, kalıcı, biyobirikimli ve toksik doğaları nedeniyle "yeni ortaya çıkan kirleticiler" olarak kabul edilmektedir (Morin-Crini et al., 2022; Chauhan, Saini, & Suthar, 2020). Geleneksel AAT'ler, bu karmaşık ve dirençli molekülleri etkin bir şekilde gidermek üzere tasarlanmamıştır, bu da su ekosistemleri ve potansiyel olarak insan sağlığı için ciddi riskler oluşturmaktadır (Ganthavee & Trzcinski, 2023). Bu endişeler, İEM'lerin su kaynaklarından uzaklaştırılması için etkili ve sürdürülebilir arıtma teknolojilerinin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır.

Bu teknolojiler arasında, İleri Oksidasyon Prosesleri (İOP'ler), güçlü reaktif oksijen türleri (ROS), özellikle de yüksek oksidasyon potansiyeline ( $E_0 = 2.8$  V) sahip hidroksil radikalleri ( $\bullet\text{OH}$ ) üreterek organik kirleticileri parçalama yetenekleri sayesinde dikkat çekmektedir (Sandoval, Vidal, Calzadilla, & Salazar, 2022). İOP'ler arasında, elektrokimyasal ileri oksidasyon prosesleri (EİOP'ler) veya basitçe elektro-oksidasyon (EO), çevre dostu olmaları, otomasyona uygunlukları, kimyasal madde ilavesi gerektirmemeleri ve ortam koşullarında çalışabilmeleri gibi önemli avantajlar sunmaktadır (Najafinejad, Chianese, Fenti, Iovino, & Musmarra, 2023; Chen, 2004). EO prosesi, anot yüzeyinde veya çözelti içinde  $\bullet\text{OH}$  radikalleri üreterek organik kirleticileri karbondioksit, su ve inorganik iyonlar gibi daha basit ve zararsız bileşiklere mineralize etme potansiyeline sahiptir.

Bu derleme çalışmasının amacı, ilaç etken maddelerinin atıksullardan giderimi için elektro-oksidasyon prosesinin mevcut durumunu, en son bilimsel gelişmeleri ve gelecekteki yönelimleri dikkate alarak kapsamlı bir şekilde incelemektir. Çalışma kapsamında, EO'nun temel prensipleri, özellikle Bor Katkılı Elmas (BDD) ve yeni nesil grafen bazlı elektrotlar anot materyallerinin performanstaki kritik rolü, farklı ilaç sınıflarının giderim verimliliği, akım yoğunluğu, pH, elektrolit tipi gibi işletme parametrelerinin süreç üzerindeki etkileri ve arıtma verimliliğini en üst düzeye çıkarmayı hedefleyen hibrit elektrokimyasal sistemler detaylı bir şekilde ele alınacaktır. Ayrıca, degradasyon mekanizmaları, oluşan potansiyel toksik ara ürünler ve arıtma maliyetini etkileyen faktörler gibi konular da güncel literatür bulguları ışığında tartışılarak, bu umut verici teknolojinin pratik uygulamalara geçişinin önündeki zorluklar ve fırsatlar değerlendirilecektir.

## 2. Elektro-Oksidasyon Prosesinin Temel Prensipleri

Elektro-oksidasyon, bir elektrokimyasal hücre içerisinde, genellikle yüksek oksidasyon potansiyeline sahip bir anot malzemesi kullanılarak organik kirleticilerin parçalandığı bir su arıtma teknolojisidir. Proses, temel olarak doğrudan oksidasyon ve dolaylı oksidasyon olmak üzere iki ana mekanizma üzerinden ilerler (Brillas & Martínez-Huitle, 2015; Kuznetsov et al., 2023).

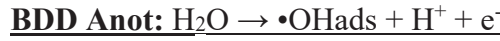
### 2.1. Doğrudan Oksidasyon

Doğrudan oksidasyonda, kirletici moleküller (R) anot yüzeyine adsorbe olur ve burada doğrudan elektron transferi yoluyla oksitlenir. Bu süreç, "aktif olmayan" anotlar olarak sınıflandırılan Pt, IrO<sub>2</sub> ve RuO<sub>2</sub> gibi malzemelerde daha baskındır. Bu elektrotlarda, suyun oksidasyonu sonucu oluşan hidroksil radikalleri, anot yüzeyine güçlü bir şekilde kemisorbe olur ve daha yüksek oksitler (MO<sub>x+1</sub>) oluşturur. Kirleticilerin oksidasyonu, bu daha yüksek oksitler aracılığıyla gerçekleşir (Martínez-Huitle & Ferro, 2006). Ancak bu mekanizma genellikle daha yavaş reaksiyon kinetiğine sahiptir ve tam mineralizasyon yerine kısmi oksidasyonla sonuçlanabilir. Brillas ve arkadaşları (2015) tarafından yapılan kapsamlı incelemeler, doğrudan oksidasyonun, özellikle organik kirleticinin anot yüzeyine adsorpsiyonunun hız sınırlayıcı adım olduğu durumlarda, dolaylı oksidasyona göre daha az etkili

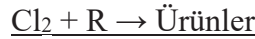
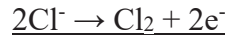
olduğunu vurgulamaktadır. Aktif anotlar (Pt, RuO<sub>2</sub>) kullanıldığında, organik molekülün oksidasyonu, yüzeyde oluşan yüksek değerli metal oksitler MO<sub>x</sub>+1 aracılığıyla gerçekleşir. Bu MO<sub>x</sub>+1 türleri, •OH'ye göre daha düşük bir oksidasyon potansiyeline sahiptir ve genellikle kirleticinin kısmi oksidasyonuna yol açarak biyolojik olarak parçalanabilir ara ürünler oluşturur. Bu durum, tam mineralizasyon için gereken enerji ve süreyi artırarak prosesin genel verimliliğini düşürür (Brillas & Martínez-Huitle, 2015).

## 2.2. Dolaylı Oksidasyon

Dolaylı oksidasyon, EO prosesinin etkinliğindeki anahtar mekanizmadır ve özellikle "aktif olmayan" anotlar olarak bilinen Bor Katkılı Elmas (BDD) ve bazı kalay dioksit (SnO<sub>2</sub>) bazlı elektrotlarda gözlemlenir. Bu elektrotlar, suyun ayrışmasına karşı yüksek bir aşırı potansiyele sahiptir, bu da anot yüzeyinde fiziksel olarak adsorbe olmuş, zayıf etkileşimli ve oldukça reaktif hidroksil radikallerinin (•OH) oluşumunu ve birikimini destekler (Einaga, 2022; Brosler, Kruth, & Nebel, 2023). Bu serbest radikaller, çözelti içerisindeki organik kirleticilerle reaksiyona girerek onları mineralize eder.



Buna ek olarak, atıksu matrisinde bulunan klorür (Cl<sup>-</sup>), sülfat (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) ve karbonat (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) gibi inorganik iyonlar da anot yüzeyinde oksitlenerek hipoklorit/klor (OCl<sup>-</sup>/Cl<sub>2</sub>), persülfat (S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup>) ve perkarbonat (C<sub>2</sub>O<sub>6</sub><sup>2-</sup>) gibi ikincil oksidanlar üretebilir (Periyasamy, & Muthuchamy, 2018). Bu güçlü oksidanlar da çözelti içinde organik kirleticilerin parçalanmasına katkıda bulunarak dolaylı oksidasyon sürecini daha da güçlendirir.



Bu çift mekanizmalı yaklaşım, EO'yu özellikle biyolojik olarak parçalanması zor olan dirençli farmasötik bileşiklerin arıtımı için oldukça etkili bir yöntem haline getirmektedir.

## 2.3. Elektrot Materyallerinin Rolü

Elektro-oksidadasyon prosesinin verimliliği, maliyeti ve genel performansı büyük ölçüde anot malzemesinin seçimine bağlıdır. İdeal bir anot, yüksek bir oksijen çıkış potansiyeline (OEP) sahip olmalı, korozyona karşı kararlı olmalı, uzun ömürlü olmalı ve kirleticilerin mineralizasyonu için yüksek bir elektrokatalitik aktivite göstermelidir (Sirés, Brillas, Oturan, Rodrigo, & Panizza, 2014). Bu bağlamda, anotlar genellikle "aktif" ve "aktif olmayan" olarak iki ana kategoride incelenir.

- **Boyutsal Kararlı Anotlar (DSA - Dimensionally Stable Anodes)**

DSA'lar, genellikle bir titanyum (Ti) substrat üzerine kaplanmış RuO<sub>2</sub>, IrO<sub>2</sub>, SnO<sub>2</sub> veya PtO<sub>2</sub> gibi metal oksit karışımlarından oluşan "aktif" anotlardır (Park et al., 2020). Bu elektrotlar, düşük OEP'ye sahiptir ve yüzeylerinde oluşan daha yüksek metal oksitler (MO<sub>x</sub>+1) aracılığıyla organiklerin seçici oksidasyonunu teşvik ederler. Özellikle klor-alkali endüstrisindeki başarıları nedeniyle yaygın olarak kullanılmışlardır. İlaç etken maddelerinin gideriminde, özellikle atıksuda klorür varlığında, klor ve hipoklorit gibi güçlü oksidanlar üreterek dolaylı oksidasyona önemli ölçüde katkıda bulunurlar (Qiao, Li, Li, & Wang, 2021). Ancak, tam mineralizasyon sağlama konusunda BDD gibi "aktif olmayan"

anotlara göre daha az verimlidirler ve klorlu organik yan ürünlerin (örneğin, trihalometanlar) oluşumuna neden olabilirler (De Coster et al., 2017).

- **Bor Katkılı Elmas (BDD) Anotlar**

BDD elektrotlar, "aktif olmayan" anotların en bilinen örneğidir ve son yıllarda elektro-oksidasyon alanında bir devrim yaratmıştır. Elmasın inert, kararlı yapısına bor atomlarının katılanmasıyla elde edilen bu elektrotlar, bilinen en yüksek oksijen çıkış potansiyellerinden birine sahiptir (Einaga, 2022; Zhi, Wang, Nakashima, Rao, & Fujishima, 2003). Bu yüksek OEP, suyun ayrışmasını baskılayarak anot yüzeyinde oldukça reaktif ve serbest hidroksil radikallerinin ( $\bullet\text{OH}$ ) bol miktarda üretilmesini sağlar. Bu radikaller, organik molekülleri seçici olmayan bir şekilde oksitleyerek tam mineralizasyona ulaştırır (Panizza & Cerisola, 2009).

BDD anotlar, çok çeşitli ilaç etken maddelerinin (örneğin, antibiyotikler, anti-inflamatuarlar, sitostatik ilaçlar) gideriminde olağanüstü bir performans sergilemiştir (Loos et al., 2018; Siedlecka, Stepnowski, & Pazdro, 2018). Yüksek akım verimliliği, kimyasal ve mekanik kararlılığı ve uzun ömürlü olması, BDD'yi farmasötik atıksuların arıtımı için en umut verici anot malzemelerinden biri yapmaktadır. Bununla birlikte, yüksek üretim maliyetleri, BDD teknolojisinin geniş ölçekli uygulanmasının önündeki en büyük engeldir (Brosler et al., 2023).

**Tablo 1:** Elektro-oksidasyonda kullanılan yaygın anot malzemelerinin karşılaştırılması (Martínez-Huitle & Ferro, 2006; Brosler et al., 2023; Zhang et al., 2020).

| Elektrot Malzemesi                                | Tipi          | Avantajları  | Dezavantajları  |
|---|---------------|--|---|
| DSA (örn. Ti/RuO <sub>2</sub> -IrO <sub>2</sub> ) | Aktif         | Düşük maliyet, klor üretimi                          | Düşük mineralizasyon verimi, klorlu yan ürünler, daha kısa ömür |
| BDD   | Aktif Olmayan | Yüksek mineralizasyon verimi, yüksek OEP, kararlılık | Yüksek maliyet, karmaşık üretim süreci                          |
| PbO <sub>2</sub>                                  | Aktif Olmayan | Yüksek OEP, düşük maliyet                            | Toksik kurşun sızıntısı riski, düşük mekanik stabilite          |
| SnO <sub>2</sub>                                  | Aktif Olmayan | Yüksek OEP, BDD'ye göre daha ucuz                    | BDD'den daha az kararlı, daha düşük akım verimi                 |

## 2.4. İşletme Parametrelerinin Etkisi

Elektro-oksidasyon prosesinin performansı, çeşitli işletme parametrelerinin dikkatli bir şekilde kontrol edilmesiyle optimize edilebilir. Bu parametreler, hem giderim verimliliğini hem de sürecin ekonomik fizibilitesini doğrudan etkiler.

### 2.4.1. Akım Yoğunluğu

Uygulanan akım yoğunluğu (veya potansiyel),  $\bullet\text{OH}$  radikallerinin ve diğer oksidanların üretim hızını belirleyen en kritik parametrelerden biridir. Genel olarak, akım yoğunluğunun artırılması, kirletici degradasyon hızını artırır çünkü daha yüksek bir akım, daha fazla reaktif oksijen türünün üretilmesini sağlar (Panizza, & Cerisola, 2004). Ancak, belirli bir noktanın üzerinde akım yoğunluğunu artırmak,

enerji verimliliğini düşürebilir. Çok yüksek akım yoğunluklarında, oksijen çıkış reaksiyonu (OER) gibi parazitik yan reaksiyonlar baskın hale gelir ve bu da akımın kirlenici oksidasyonu yerine suyun elektrolizi için harcanmasına neden olur (Comninellis, 1994). Bu nedenle, her sistem ve kirlenici için optimum bir akım yoğunluğu aralığının belirlenmesi hem etkili bir arıtma sağlamak hem de enerji tüketimini en aza indirmek için önemlidir.

#### 2.4.2. pH

Çözelti pH'ı, hem elektrot yüzeyinin özelliklerini hem de kirlenici molekülün ve oluşan oksidan türlerinin yapısını etkileyerek EO prosesini önemli ölçüde değiştirebilir. Örneğin, asidik koşullar genellikle BDD anotlarda daha yüksek bir oksijen çıkış potansiyeli sağlayarak  $\bullet\text{OH}$  üretimini destekler (Govindarajan, Xu & Chan, 2022). Buna karşılık, alkali koşullarda, hidroksil radikalleri daha az reaktif olan diğer radikal türlerine dönüşebilir. Ayrıca, klorür içeren sularda, pH, klor ( $\text{Cl}_2$ ), hipokloröz asit ( $\text{HOCl}$ ) ve hipoklorit iyonu ( $\text{OCl}^-$ ) arasındaki dengeyi kontrol eder; bu türlerin her birinin farklı oksidasyon potansiyelleri ve reaktiviteleri vardır. Kirlenici molekülün protonlanma durumu da pH'a bağlıdır ve bu durum, molekülün elektrot yüzeyi ile etkileşimini ve reaktivitesini etkileyebilir (Liang et al., 2024).

#### 2.4.3. Elektrolit Tipi ve Konsantrasyonu

Atıksuyun iletkenliğini artırmak ve enerji tüketimini düşürmek için genellikle sodyum sülfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) veya sodyum klorür ( $\text{NaCl}$ ) gibi destekleyici bir elektrolit kullanılır. Elektrolit tipi, dolaylı oksidasyon mekanizması üzerinde belirleyici bir rol oynar.  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  gibi "aktif olmayan" bir elektrolit varlığında, oksidasyon esas olarak  $\bullet\text{OH}$  radikalleri aracılığıyla gerçekleşir. Buna karşılık,  $\text{NaCl}$  varlığında, anot yüzeyinde üretilen aktif klor türleri ( $\text{Cl}_2$ ,  $\text{HOCl}$ ,  $\text{OCl}^-$ ) baskın oksidanlar haline gelir (Periyasamy & Muthuchamy, 2018). Klor bazlı oksidasyon genellikle çok hızlı ve etkili olsa da, klorlu organik yan ürünlerin oluşma riski nedeniyle dikkatli bir şekilde yönetilmelidir. Elektrolit konsantrasyonunun artırılması genellikle iletkenliği artırarak ve daha fazla ikincil oksidan üreterek giderim hızını artırır, ancak aşırı konsantrasyonlar maliyeti artırabilir ve istenmeyen yan reaksiyonlara yol açabilir.

### 3. Farklı İlaç Sınıflarının Giderimi

Elektro-oksidadasyon prosesinin etkinliği, hedeflenen ilaç molekülünün kimyasal yapısına, stabilitesine ve reaktivitesine bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik gösterebilir. İlaç etken maddeleri, kimyasal yapılarına ve fonksiyonel gruplarına göre farklı elektrokimyasal reaktivite gösterirler. Bu nedenle, arıtma verimliliği, kullanılan elektrot malzemesi ve proses koşullarına göre büyük ölçüde değişir. Literatürde, çeşitli terapötik sınıflara ait ilaçların EO ile giderimi üzerine yapılan çalışmalar, bu teknolojinin geniş bir uygulama yelpazesine sahip olduğunu göstermektedir.

#### 3.1. Antibiyotikler

Antibiyotikler, sucul ortamlarda antibiyotik direncinin yayılmasına neden olmaları nedeniyle özel bir endişe kaynağıdır ve geleneksel arıtma yöntemlerine karşı yüksek direnç gösterirler. Elektro-oksidadasyon (EO), sülfonamidler (örneğin, sülfametoksazol - SMX), tetrasiklinler (örneğin, Tetrasiklin - TC), kinolonlar ve beta-laktamlar gibi çeşitli antibiyotik sınıflarının gideriminde yüksek verimlilik göstermiştir (Wang, & Zhuan, 2020).

Sülfonamidler ve Tetrasiklinler: SMX gibi sülfonamidler, BDD anotlar kullanılarak pH 3.0 gibi asidik koşullarda hızlı bir şekilde giderilebilir ve yüksek mineralizasyon verimine ulaşılabilir. Giderim mekanizması, hem doğrudan elektron transferi (DET) hem de hidroksil radikalleri ( $\bullet\text{OH}$ ) ile dolaylı oksidasyon yoluyla gerçekleşir (Wang, & Zhuan, 2020). Tetrasiklin (TC) gibi daha karmaşık yapıdaki antibiyotikler için ise, Fe-Co dual-atom katalizörler ile desteklenmiş elektrokimyasal

sistemler, %90'ın üzerinde giderim verimi sağlamaktadır. Bu proseslerde, aromatik halka açılması ve deaminasyon gibi yapısal değişiklikler ana degradasyon adımlarıdır.

Kinolonlar: Siprofloksasin gibi kinolon grubu antibiyotiklerin gideriminde, flor atomlarının salınımı (deflorizasyon) ve piperazin halkasının parçalanması gibi spesifik mekanizmalar gözlemlenir. BDD anotlar, yüksek oksidasyon gücü sayesinde bu tür dirençli bileşiklerin yapısındaki halojen atomlarını etkin bir şekilde uzaklaştırabilir.

### 3.2. Non-Steroid Anti-İnflamatuar İlaçlar (NSAID'ler)

Diklofenak (DCF), ibuprofen (IBP), parasetamol ve naproksen gibi yaygın olarak kullanılan NSAID'ler, dünya genelinde yüzey sularında en sık tespit edilen ilaçlardır. Bu bileşiklerin EO ile giderimi, yüksek toksisite potansiyelleri nedeniyle kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

**Diklofenak (DCF):** DCF, elektrokimyasal arıtma için en çok çalışılan NSAID'lerden biridir. BDD anotlar kullanılarak yapılan çalışmalarda, C-N bağının kopması ve klor atomlarının salınımı (deklorinasyon) yoluyla tam mineralizasyonun mümkün olduğu gösterilmiştir (Soomro et al., 2025; Brillas, 2025). Pt-SnO<sub>2</sub>/Ti gibi DSA anotlar da etkili olsa da, BDD'nin mineralizasyon verimi genellikle daha yüksektir.

**İbuprofen (IBP) ve Parasetamol:** IBP'nin elektrokimyasal oksidasyon kinetiği üzerine yapılan çalışmalar, BDD'nin Pt anotlara göre çok daha üstün olduğunu ortaya koymuştur. IBP'nin degradasyonu, karboksil grubunun dekarboksilasyonu ile başlar. Parasetamol (Acetaminophen) ise, hidroksilasyon ve p-benzokinon oluşumu üzerinden ilerleyen bir degradasyon yolu izler. Grafit anotlar bile uygun koşullarda (optimize edilmiş pH, elektrolit konsantrasyonu ve akım yoğunluğu) parasetamol gideriminde yüksek verim sağlayabilir (Periyasamy & Muthuchamy, 2018).

### 3.3. Antidepresanlar ve Diğer İlaç Sınıfları

EO, antidepresanlar, sitostatik (antikanser) ilaçlar ve X-ray kontrast maddeleri gibi diğer dirençli ilaç sınıflarının arıtımında da başarılı bir şekilde uygulanmıştır.

**Antidepresanlar:** Karbamazepin (CBZ), geleneksel AAT'lerde biyolojik olarak parçalanmaya karşı gösterdiği yüksek direnç nedeniyle "zorlu" bir kirletici olarak bilinir. Ancak, üç boyutlu elektrokimyasal sistemler ve elektro-Fenton (EF) gibi geliştirilmiş prosesler ile %95'in üzerinde giderim verimliliklerine ulaşılabilmektedir. CBZ'nin degradasyonu, epoksidasyon ve halka daralması gibi karmaşık mekanizmalar içerir (Liu et al., 2018). Florlu bir antidepresan olan Fluoksetin (Prozac) için ise, Fotoelektro-Fenton (PEF) gibi hibrit prosesler, flor atomlarının tamamen salınımını ve tam mineralizasyonu sağlamada kritik rol oynamaktadır (Georgin et al., 2025).

**Sitostatik İlaçlar ve X-Ray Kontrast Maddeleri:** Metotreksat gibi sitostatik ilaçlar, yüksek toksisiteleri nedeniyle özel bir arıtma gerektirir. EO, bu tür ilaçların hızlı bir şekilde parçalanmasını sağlar. X-ray kontrast maddeleri (örneğin, İopromid) ise, yapısal olarak iyot atomları içerir. EO prosesi, bu bileşiklerin iyot atomlarını salarak (deiyodizasyon) organik yapıyı parçalama yeteneğine sahiptir. Bu tür halojenli bileşiklerin gideriminde, oluşan halojenli yan ürünlerin toksisitesinin dikkatle izlenmesi gerekmektedir.

## 4. Hibrit Elektrokimyasal Prosesler

Elektro-oksidasyon (EO) prosesinin tek başına etkinliği yüksek olsa da, arıtma verimliliğini daha da artırmak, enerji tüketimini düşürmek, reaksiyon hızını yükseltmek ve daha karmaşık atıksu matrislerine uyum sağlamak amacıyla diğer İOP'ler ile birleştirildiği hibrit sistemler yoğun bir şekilde araştırılmaktadır. Bu sistemler, farklı teknolojilerin avantajlarını bir araya getirerek sinerjistik etkiler



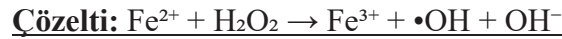
yaratır ve genellikle tekil proseslerden daha üstün bir performans sergiler (Brillas & Garcia-Segura, 2025).

Hibrit elektrokimyasal proseslerin temelinde, tekil EO prosesinde olduğu gibi, anot yüzeyinde oluşan adsorbe olmuş hidroksil radikali  $\bullet\text{OH}$ ads ve çözelti içinde üretilen serbest hidroksil radikali  $\bullet\text{OH}$  arasındaki sinerji yatar.  $\bullet\text{OH}$ ads, özellikle BDD gibi yüksek oksijen çıkış potansiyeline sahip anotlarda, kirleticilerin doğrudan yüzey oksidasyonunda kritik rol oynar (Brillas et al., 2015). Hibrit sistemler, örneğin Elektro-Fenton (EF) prosesinde, katotta üretilen  $\text{H}_2\text{O}_2$ 'nin  $\text{Fe}^{2+}$  ile reaksiyonu sonucu çözelti içinde serbest  $\bullet\text{OH}$  radikallerinin bol miktarda üretilmesiyle,  $\bullet\text{OH}$ ads' nin sağladığı yüzey oksidasyonuna ek olarak hacimsel oksidasyon gücü ekler. Bu çift mekanizmalı radikal üretimi, hem reaksiyon kinetiğini hızlandırır hem de kirleticilerin daha hızlı ve tam mineralizasyonunu sağlar (Sirés et al., 2014; Panizza & Cerisola, 2009).

Elektro-oksidasyon prosesinin verimliliğini daha da artırmak, enerji tüketimini azaltmak ve farklı kirletici türlerine karşı etkinliği genişletmek amacıyla, EO'nun diğer ileri oksidasyon prosesleri ile birleştirildiği hibrit sistemler geliştirilmiştir. Bu sistemler, sinerjistik etkiler yaratarak genellikle tekil proseslerden daha üstün bir performans sergilemektedir (Zhang et al., 2015).

#### 4.1. Elektro-Fenton (EF)

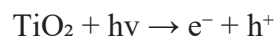
Elektro-Fenton prosesi, klasik Fenton reaksiyonu ( $\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2$ ) ile elektrokimyasal proseslerin birleştirilmesine dayanır. Bu sistemde, hidrojen peroksit ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) genellikle oksijenin katotta indirgenmesiyle yerinde (in-situ) üretilirken, Fenton reaktifi olan  $\text{Fe}^{2+}$  iyonları da çözeltiye eklenir veya bir demir anotun kurban olarak kullanılmasıyla sağlanır (Brillas, Sirés, & Oturan, 2009). Üretilen  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  iyonları tarafından katalitik olarak parçalanarak çözelti içinde homojen bir şekilde hidroksil radikalleri ( $\bullet\text{OH}$ ) oluşturur. Bu, anot yüzeyinde üretilen radikallere ek olarak güçlü bir oksidasyon kapasitesi sağlar.

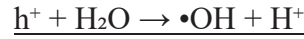


EF prosesi, özellikle nötr pH'a yakın koşullarda çalışan ve biyo-elektro-Fenton (BEF) gibi varyasyonları ile ilaç etken maddelerinin gideriminde oldukça etkili bulunmuştur (Nadais et al., 2018; Zhang et al., 2015). Liu ve arkadaşları (2018), demir oksit nanoparçacıkları içeren bir katot kullanarak geliştirdikleri elektro-Fenton sistemi ile kalıcı bir kirletici olan karbamazepinin tam mineralizasyonunu başarmışlardır. Son zamanlarda yapılan çalışmalar, EF prosesini elektrokoagülasyon gibi diğer elektrokimyasal yöntemlerle birleştirerek hem organik kirleticilerin hem de askıda katı maddelerin aynı anda giderildiği hibrit sistemlerin etkinliğini göstermiştir (Alismaeel, Saeed, & Abbar, 2025).

#### 4.2. Fotoelektro-Kataliz (FEK)

Fotoelektro-kataliz, elektrokimyasal oksidasyon ile fotokatalizin birleşimidir. Bu sistemde, genellikle  $\text{TiO}_2$  gibi bir yarı iletken malzeme anot olarak kullanılır. Anot, uygun dalga boyunda bir ışık (genellikle UV) ile aydınlatıldığında, valans bandında elektron boşlukları ( $\text{h}^+$ ) ve iletim bandında elektronlar ( $\text{e}^-$ ) oluşur. Aynı zamanda bir potansiyel uygulanması, bu elektron-boşluk çiftlerinin yeniden birleşmesini engelleyerek verimliliği artırır (Fujishima, Rao, & Tryk, 2000). Yüzeyde oluşan bu güçlü oksitleyici boşluklar ( $\text{h}^+$ ) ve bunların su ile reaksiyonu sonucu oluşan  $\bullet\text{OH}$  radikalleri, organik kirleticileri etkin bir şekilde parçalar.





FEK prosesinin en büyük avantajlarından biri, sürdürülebilir bir enerji kaynağı olan güneş ışığını kullanabilmesidir (solar FEK). Son yıllarda geliştirilen fotoelektro-Fenton (FEF) prosesi ise bu sinerjiyi bir adım öteye taşır. FEF sisteminde, UV ışığı hem yarı iletken anodu aktive eder hem de Fenton reaksiyonunda oluşan  $Fe(OH)^{2+}$  gibi kompleksleri fotolize uğratarak  $Fe^{2+}$  iyonlarının rejenerasyonunu hızlandırır ve ek  $\bullet OH$  radikalleri üretir. Bu üçlü sinerji (elektrokimya, fotokataliz ve Fenton reaksiyonu), özellikle dirençli farmasötiklerin mineralizasyonunda olağanüstü sonuçlar vermektedir. Hatta, COVID-19 pandemisi sırasında kullanılan ilaçların giderimi için güneş ışığı ve ozonla zenginleştirilmiş hibrit FEF sistemleri dahi geliştirilmiştir. Herrera-Chávez ve arkadaşları (2025), güneş ışınımı ve ozon ile yoğunlaştırılmış hibrit ileri elektrokimyasal oksidasyon prosesi kullanarak COVID-19 ile ilişkili farmasötik kirleticilerin (deksametazon, parasetamol, amoksisilin ve azitromisin) sürdürülebilir bir şekilde giderildiğini göstermişlerdir. FEK, özellikle BDD gibi pahalı elektrotlara bir alternatif olarak görülmekte ve güneş ışığının kullanılabilirdiği sistemler sayesinde sürdürülebilir bir arıtma potansiyeli sunmaktadır (Alulema-Pullupaxi et al., 2021).

### 4.3. Diğer Hibrit Sistemler: Sono-Elektrokimya ve Membran Reaktörler

EO prosesinin etkinliğini artırmak için kullanılan diğer önemli hibrit yaklaşımlar arasında ultrason (sono-elektrokimya) ve membran proseslerinin entegrasyonu yer almaktadır.

**Sono-Elektrokimyasal Prosesler:** Bu sistemlerde, reaktöre yüksek frekanslı ultrason dalgaları (20 kHz - 1 MHz) uygulanır. Ultrasonik kaviteasyon, yani mikroskobik kabarcıkların oluşumu, büyümesi ve şiddetle çökmesi, yerel olarak aşırı yüksek sıcaklıklar (~5000 K) ve basınçlar (~1000 atm) yaratır. Bu koşullar altında su molekülleri termal olarak parçalanarak ek  $\bullet OH$  radikalleri üretir (sonoliz). Ayrıca, kaviteasyonun yarattığı mikro-akıntılar, elektrot yüzeyindeki kütle transferini önemli ölçüde iyileştirir, kirletici moleküllerin anoda taşınmasını hızlandırır ve elektrot yüzeyini pasivasyona neden olabilecek polimerik filmlerden temizler. Bu birleşik etkiler, özellikle elektrokimyasal oksidasyonun tek başına yetersiz kaldığı durumlarda giderim verimini ve reaksiyon hızını çarpıcı bir şekilde artırabilir (Ang, Tran, Drogui, & Mohammad, 2022).

**Elektrokimyasal Membran Reaktörler (EMR'ler):** Bu yenilikçi sistemler, membran filtrasyonunu (örneğin, ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon) elektrokimyasal reaksiyonlarla tek bir reaktör içinde birleştirir. Geleneksel membran sistemlerinin en büyük sorunu olan membran kirlenmesi (fouling), EMR'lerde elektrokimyasal olarak kontrol altına alınabilir. Örneğin, membran yüzeyinde veya yakınında oluşturulan oksidatif türler ( $\bullet OH$ ,  $OCl^-$ ) veya gaz kabarcıkları ( $O_2$ ,  $H_2$ ), membran gözeneklerini tıkayan organik maddeleri parçalayarak veya yüzeyden uzaklaştırarak membranın akısını ve ömrünü uzatır. Daha da önemlisi, reaktif elektrokimyasal membranların (REM'ler) kullanıldığı sistemlerde, membranın kendisi anot veya katot işlevi görür. Bu sayede, atıksu membrandan geçerken kirleticiler doğrudan reaktif yüzeyle temas ederek parçalanır. Bu yaklaşım, reaktör hacmini küçültür ve kütle transferi sınırlamalarını ortadan kaldırarak arıtma verimliliğini en üst düzeye çıkarır (Teng, Zeng, Ma, Chen, & Lin, 2020; Xue et al., 2025).

### 4.4. Hibrit Proseslerin Karşılaştırmalı Analizi

Hibrit elektrokimyasal proseslerin seçimi, atıksuyun karakterizasyonu, hedeflenen giderim verimliliği ve ekonomik kısıtlar doğrultusunda yapılmalıdır. Tablo 2, farmasötik atıksu arıtımında kullanılan temel hibrit proseslerin avantaj ve dezavantajlarını karşılaştırmalı olarak sunmaktadır (Brillas & Garcia-Segura, 2025; Phu et al., 2025; Xue et al., 2025).

**Tablo 2:** *Farmasötik atıksu arıtımında kullanılan temel hibrit proseslerin karşılaştırılması* (Brillas & Garcia-Segura, 2025; Phu et al., 2025; Xue et al., 2025).

| Hibrit Proses                 | Temel Mekanizma   | Avantajlar   | Dezavantajlar   |
|-------------------------------|---|--|---|
| Elektro-Fenton (EF)           | Katodik H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> üretimi + Fenton reaksiyonu | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 'nin yerinde üretimi (güvenli), Fe <sup>2+</sup> rejenerasyonu, yüksek mineralizasyon, homojen oksidasyon. | Asidik pH gereksinimi (pH ~3), elektrolit ihtiyacı, katot kirlenmesi riski.         |
| Elektro-Koagülasyon (EC)      | Kurban anot çözünmesi + Flokülasyon                               | Kimyasal madde gerektirmez, AKM ve kolloid gideriminde mükemmel, düşük maliyet, basit ekipman.   | Yüksek çamur üretimi, anot pasivasyonu, tam mineralizasyonda yetersizlik.           |
| Fotoelektro-Kataliz (FEK/FEF) | UV/Güneş ışığı + Elektrokimya                                     | Güneş enerjisi kullanımı, sinerjistik etki, Fe <sup>2+</sup> rejenerasyonunun hızlanması, çok yüksek mineralizasyon.                     | Yüksek yatırım maliyeti, suyun bulanıklığından etkilenme, karmaşık sistem tasarımı. |
| Sono-Elektrokimya             | Ultrasonik kaviteasyon + Elektrokimya                             | Kütle transferinin iyileştirilmesi, elektrot temizliği, ek radikal üretimi, yüksek reaksiyon hızı.                                       | Yüksek enerji tüketimi, gürültü kirliliği, ekipman aşınması.                        |
| Elektrokimyasal Membran (EMR) | Filtrasyon + Oksidasyon   | Membran kirlenmesinin (fouling) önlenmesi, kompakt tasarım, yüksek seçicilik, filtrasyon ve oksidasyon bir arada.                        | Membran maliyeti, karmaşık işletme, potansiyel membran hasarı.                      |

Bu hibrit sistemler, elektro-oksidasyonun uygulama alanını genişletmekte ve onu daha sağlam, verimli ve ekonomik olarak rekabetçi bir teknoloji haline getirme potansiyeli taşımaktadır.

## 5. Sonuç ve Öneriler

Elektro-oksidasyon, atıksularda bulunan kalıcı ve biyolojik olarak parçalanması zor ilaç etken maddelerinin giderimi için güçlü ve umut verici bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Bu derlemede incelendiği üzere, EO prosesi, özellikle BDD gibi yüksek performanslı anotlar kullanıldığında, çok çeşitli farmasötik bileşikleri yüksek verimlilikle mineralize etme potansiyeline sahiptir. Prosesin temel avantajları arasında kimyasal madde ilavesine gerek duyulmaması, otomasyona uygunluğu ve ortam koşullarında çalışabilmesi yer almaktadır. Akım yoğunluğu, pH ve elektrolit kompozisyonu gibi işletme parametrelerinin dikkatli bir şekilde optimize edilmesi, hem arıtma verimliliğini en üst düzeye çıkarmak hem de enerji maliyetlerini yönetmek için kritik öneme sahiptir.

Bununla birlikte, teknolojinin geniş ölçekli pratik uygulamalara geçişinin önünde hala bazı zorluklar bulunmaktadır. BDD gibi en etkili anot malzemelerinin yüksek maliyeti, en önemli ekonomik engeldir. Ayrıca, gerçek atıksu matrislerinin karmaşıklığı (örneğin, doğal organik madde varlığı, iletkenlik dalgalanmaları), laboratuvar ölçeğinde elde edilen verimliliklerin endüstriyel ölçekte tekrarlanmasını zorlaştırabilmektedir. Klorür içeren sularda potansiyel olarak toksik klorlu organik yan ürünlerin oluşumu da dikkatle yönetilmesi gereken bir diğer konudur.

Gelecekteki araştırmalar, daha düşük maliyetli ve yüksek performanslı yeni nesil anot malzemelerinin geliştirilmesine odaklanmalıdır. Grafen bazlı elektrotlar, metal oksit nanoyapıları ve kompozit malzemeler bu alanda umut vaat etmektedir. Elektro-Fenton ve fotoelektro-kataliz gibi hibrit

sistemlerin sinerjistik etkilerinin daha derinlemesine anlaşılması ve optimize edilmesi, arıtma verimliliğini artırabilir ve enerji tüketimini azaltabilir. Özellikle, yenilenebilir enerji kaynakları (güneş, rüzgar) ile entegre edilmiş elektrokimyasal reaktörlerin tasarımı, EO'yu daha sürdürülebilir ve ekonomik olarak cazip bir teknoloji haline getirecektir. Son olarak, degradasyon yollarının aydınlatılması, ara ürünlerin toksisitesinin değerlendirilmesi ve gerçek endüstriyel ve kentsel atıksu koşullarında uzun süreli pilot ölçekli çalışmaların yapılması, bu teknolojinin güvenli ve etkili bir şekilde yaygınlaşması için elzemdir.

**KAYNAKÇA**

- Alismaeel, Z. T., Saeed, O. F., & Abbar, A. H. (2025). Wastewater treatment through a hybrid electrocoagulation and electro-Fenton process with a porous graphite air-diffusion cathode. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 212, 110258. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2025.110258>
- Alulema-Pullupaxi, P., Espinoza-Montero, P. J., Sigcha-Pallo, C., Vargas, R., Fernández, L., Peralta-Hernández, J. M., & Paz, J. L. (2021). Fundamentals and applications of photoelectrocatalysis as an efficient process to remove pollutants from water: A review. *Chemosphere*, 281, 130821. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130821>
- Ang, W. L., McHugh, P. J., & Symes, M. D. (2022). Sonoelectrochemical processes for the degradation of persistent organic pollutants. *Chemical Engineering Journal*, 444, 136573. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136573>
- Arslantaş, M., & Gökkuş, Ö. (2023). Tetrasiklin giderimi için elektrokimyasal oksidasyon yöntemi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 39(1), 54-69.
- Babu, B. R., & Basha, C. A. (2009). Removal of pharmaceuticals from wastewater by electrooxidation. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 44(9), 878-886. <https://doi.org/10.1080/10934520902996880>
- Bamos, G., Petala, A., & Frontistis, Z. (2021). Recent trends in pharmaceuticals removal from water using electrochemical oxidation processes. *Environments*, 8(8), 85. <https://doi.org/10.3390/environments8080085>
- Bharath, G., & Rambabu, K. (2023). Photoelectrochemical advanced oxidation processes for simultaneous removal of antibiotics and heavy metal ions in wastewater. *Environmental Pollution*, 15,339, 122753. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122753>
- Blessy, M., Patel, R. D., Prajapati, P. N., & Agrawal, Y. K. (2014). Development of forced degradation and stability indicating studies of drugs—A review. *Journal of Pharmaceutical Analysis*, 4(3), 159-165. <https://doi.org/10.1016/j.jpha.2013.09.003>
- Brillas, E. (2025). A review on the application of single and combined Fenton, photo-Fenton, and electrochemical advanced oxidation processes to remove diclofenac from aqueous media. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.115443>
- Brillas, E., & Martínez-Huitle, C. A. (2015). Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods: An updated review. *Applied Catalysis B: Environmental*, 166, 603-643. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.11.016>
- Brillas, E., Sirés, I., & Oturan, M. A. (2009). Electro-Fenton process and related electrochemical technologies based on Fenton's reaction chemistry. *Chemical Reviews*, 109(12), 6570-6631. <https://doi.org/10.1021/cr900136g>
- Brosler, P., Kruth, A., & Nebel, C. E. (2023). In-house vs. commercial boron-doped diamond electrodes: A comparative study. *Frontiers in Materials*, 10, 1020649. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1020649>
- Chauhan, M., Saini, V.K. & Suthar, S. (2020). Removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) from water by adsorption on aluminum pillared clay. *J Porous Mater* 27, 383–393. <https://doi.org/10.1007/s10934-019-00817-8>
- Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 38(1), 11-41. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2003.10.006>

- Comminellis, C. (1994). Electrocatalysis in the electrochemical conversion/combustion of organic pollutants for waste water treatment. *Electrochimica Acta*, 39(11-12), 1857-1862. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(94\)85175-1](https://doi.org/10.1016/0013-4686(94)85175-1)
- da Silva, S. W., Welter, J. B., Albornoz, L. L., & da Silva, A. (2021). Advanced electrochemical oxidation processes in the treatment of pharmaceutical containing water and wastewater: A review. *Current Pollution Reports*, 7(2), 146-159. <https://doi.org/10.1007/s40726-021-00176-6>
- Daghrir, R., Fall, C. S., & Drogui, P. (2023). Assessment of an electrochemical advanced oxidation process for municipal wastewater treatment. *RSC Environmental Chemistry*, 1(1), 1-15. <https://doi.org/10.1039/D3EW00432E>
- De Coster, J., Vanherck, W., Appels, L., & Dewil, R. (2017). Selective electrochemical degradation of 4-chlorophenol at a Ti/RuO<sub>2</sub>-IrO<sub>2</sub> anode in chloride rich wastewater. *Journal of Environmental Management*, 190, 61-71. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.049>
- Einaga, Y. (2022). Boron-doped diamond electrodes: Fundamentals and applications. *Accounts of Chemical Research*, 55(24), 3605-3615. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.2c00597>
- Fujishima, A., Rao, T. N., & Tryk, D. A. (2000). Titanium dioxide photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 1(1), 1-21. [https://doi.org/10.1016/S1389-5567\(00\)00002-2](https://doi.org/10.1016/S1389-5567(00)00002-2)
- Ganthavee, V., & Trzcinski, A. P. (2023). Removal of pharmaceutically active compounds from wastewater using adsorption coupled with electrochemical oxidation technology: a critical review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 126, 20-35. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.06.003>
- Georgin, J., Sima, V., Nica, E., & Burcea, S. G. (2025). From prescription to pollution: Assessing the ecological risks of antidepressants. *Sustainability*, 17(21), 9752. <https://doi.org/10.3390/su17219752>
- Govindarajan, N., Xu, A., & Chan, K. (2022). How pH affects electrochemical processes. *Science*, 375(6579), 379-380. <https://doi.org/10.1126/science.abj2421>
- Hadavand, N., Khazalpour, S., Fotouhi, L. *et al.* (2025). Electrochemical degradation of Cephalexin on Ti/TiO<sub>2</sub>/βPbO<sub>2</sub> anode modified by sodium dodecyl sulfate. *Sci Rep* 15, 10243. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-94543-8>
- Herrera-Chávez, S., Pacheco-Álvarez, M., Godínez, L. A., Brillas, E., & Peralta-Hernández, J. M. (2025). Hybrid Solar Photoelectro-Fenton and Ozone Processes for the Sustainable Removal of COVID-19 Pharmaceutical Contaminants. *Processes*, 13(10), 3234. <https://doi.org/10.3390/pr13103234>
- Jiménez-Salcedo, M., Monge, M., & Tena, M. T. (2020). Study of intermediate by-products and mechanism of the photocatalytic degradation of ciprofloxacin in water using graphitized carbon nitride nanosheets. *Chemosphere*, 247, 125910. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125910>
- Kuznetsov, V. V., Ivantsova, N. A., Kuzin, E. N., Pirogov, A. V., Mezhev, Y. O., Filatova, E. A., & Averina, Y. M. (2023). Study of the Process of Electrochemical Oxidation of Active Pharmaceutical Substances on the Example of Nitrofurazone ((2 E)-2-[(5-Nitro-2-furyl)methylene] hydrazine Carboxamide). *Water*, 15(19), 3370. <https://doi.org/10.3390/w15193370>
- Liang, C., Katayama, Y., Tao, Y., Morinaga, A., Moss, B., Celorrio, V., ... & Rao, R. R. (2024). Role of electrolyte pH on water oxidation for iridium oxides. *Journal of the American Chemical Society*, 146(13), 8928-8938. <https://doi.org/10.1021/jacs.3c12011>

- Liu, K., Yu, J. C. C., Dong, H., Wu, J. C., & Hoffmann, M. R. (2018). Degradation and mineralization of carbamazepine using an electro-Fenton reaction catalyzed by magnetite nanoparticles fixed on an electrocatalytic carbon fiber textile cathode. *Environmental science & technology*, 52(21), 12667-12674. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b03916>
- Loos, G., Scheers, T., Van Eyck, K., Van Schepdael, A., Adams, E., Van der Bruggen, B., Cabooter, D., & Dewil, R. (2018). Electrochemical oxidation of key pharmaceuticals using a boron doped diamond electrode. *Separation and Purification Technology*, 195, 184-191. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.12.009>
- López Zavala, M. Á., & Jaber Lara, C. R. (2018). Degradation of paracetamol and its oxidation products in surface water by electrochemical oxidation. *Environmental engineering science*, 35(11), 1248-1254. <https://doi.org/10.1089/ees.2018.0023>
- Martínez-Huitle, C. A., & Ferro, S. (2006). Electrochemical oxidation of organic pollutants for the wastewater treatment: Direct and indirect processes. *Chemical Society Reviews*, 35(12), 1324-1340. <https://doi.org/10.1039/B517632H>
- Morin-Crini, N., Lichtfouse, E., Liu, G., Balam, V., Ribeiro, A. R. L., Lu, Z., ... Crini, G. (2022). Worldwide cases of water pollution by emerging contaminants: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(4), 2311-2338. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01447-4>
- Nadais, H., Li, X., Alves, N., Couras, C., Andersen, H. R., Angelidaki, I., & Zhang, Y. (2018). Bio-electro-Fenton process for the degradation of non-steroidal anti-inflammatory drugs in wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 338, 401-410. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.014>
- Najafinejad, M. S., Chianese, S., Fenti, A., Iovino, P., & Musmarra, D. (2023). Application of electrochemical oxidation for water and wastewater treatment: An overview. *Molecules*, 28(10), 4208. <https://doi.org/10.3390/molecules28104208>
- Panizza, M., & Cerisola, G. (2004). Influence of anode material on the electrochemical oxidation of 2-naphthol: Part 2. Bulk electrolysis experiments. *Electrochimica acta*, 49(19), 3221-3226. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2004.02.036>
- Panizza, M., & Cerisola, G. (2009). Direct and mediated anodic oxidation of organic pollutants. *Chemical Reviews*, 109(12), 6541-6569. <https://doi.org/10.1021/cr9001319>
- Park, S. R., Lee, J. H., Kim, T. H., Cho, S. K., Chang, I. S., & Park, J. S. (2020, May). Dimensionally Stable Anodes Using Titanium Substrates with Nanostructured Surface. In *Electrochemical Society Meeting Abstracts* 237 (38), 1651-1651. <https://doi.org/10.1149/MA2020-01381651mtgabs>
- Periyasamy, S., & Muthuchamy, M. (2018). Electrochemical oxidation of paracetamol in water by graphite anode: effect of pH, electrolyte concentration and current density. *Journal of environmental chemical engineering*, 6(6), 7358-7367. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2018.08.036>
- Qiao, Q., Singh, S., Lo, S. L., Jin, J., Chang Yu, Y., & Wang, L. (2021). Effect of current density and pH on the electrochemically generated active chloro species for the rapid mineralization of p-substituted phenol. *Chemosphere*, 275, 129848. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129848>
- Sandoval, M. A., Vidal, J., Calzadilla, W., & Salazar, R. (2022). Solar (electrochemical) advanced oxidation processes as efficient treatments for degradation of pesticides. *Current Opinion in Electrochemistry*, 36, 101125. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2022.101125>
- Siedlecka, E. M., Ofiarska, A., Borzyszkowska, A. F., Białk-Bielińska, A., Stepnowski, P., & Pieczyńska, A. (2018). Cytostatic drug removal using electrochemical oxidation with BDD

electrode: Degradation pathway and toxicity. *Water research*, 144, 235–245. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.035>

- Sirés, I., Brillas, E., Oturan, M. A., Rodrigo, M. A., & Panizza, M. (2014). Electrochemical advanced oxidation processes: Today and tomorrow. A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(14), 8336-8367. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2783-1>
- Soomro, R. A., Al-Ghamdi, A. A., & Al-Ghamdi, A. A. (2025 ). Degradation of diclofenac using advanced oxidation processes. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 60(1), 1-15. <https://doi.org/10.1080/10934529.2025.2472116>
- Wang, J., & Zhuan, R. (2020). Degradation of antibiotics by advanced oxidation processes: An overview. *The Science of the total environment*, 701, 135023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135023>
- Xue, W., Tabucanon, A. S., Amarakoon, A. M. S. N., Xiao, K., & Huang, X. (2025). Recent advances in membrane and electrochemical hybrid technologies for emerging contaminants removal. *Water Cycle* 6(2025), 176-194. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2025.02.004>
- Zhang, C., Zhou, M., Ren, G., Yu, X., Ma, L., Yang, J., & Yu, F. (2015). Heterogeneous electro-Fenton using modified iron–carbon as catalyst for 2, 4-dichlorophenol degradation: Influence factors, mechanism and degradation pathway. *Water Research*, 70, 414-424. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.12.022>
- Zhang, G., Huang, X., Ma, J., Wu, F., & Zhou, T. (2020). Ti/RuO<sub>2</sub>-IrO<sub>2</sub>-SnO<sub>2</sub> anode for electrochemical degradation of pollutants in pharmaceutical wastewater: optimization and degradation performances. *Sustainability*, 13(1), 126. <https://doi.org/10.3390/su13010126>
- Zhi, J. F., Wang, H. B., Nakashima, T., Rao, T. N., & Fujishima, A. (2003). Electrochemical incineration of organic pollutants on boron-doped diamond electrode. Evidence for direct electrochemical oxidation pathway. *The Journal of Physical Chemistry B*, 107(48), 13389-13395. <https://doi.org/10.1021/jp030279g>



//

# Bölüm 7

## SÜRDÜRÜLEBİLİR KENTLEŞMEDE GÜN IŞIĞI: TOPLU KONUT ALANLARINDA GÜNEŞLENME SÜRESİ ANALİZİ

*Ahmet USLU<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi; Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Tavşanlı Meslek Yüksekokulu Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü. ahmet.uslu1@dpu.edu.tr ORCID No: 0000-0001-8745-423X

## 1. GİRİŞ

Hızlı kentleşme, artan nüfus yoğunluğu, yoğun yapılaşma baskısı ve iklim krizi, kentsel alanlarda sürdürülebilirlik odaklı planlama ve tasarım yaklaşımlarını zorunlu hâle getirmiştir (UN-HABITAT, 2024). Bu süreçte, doğal kaynakların etkin kullanımı, enerji tüketiminin azaltılması ve yaşam kalitesinin artırılması sürdürülebilir kentleşmenin temel bileşenleri arasında yer almaktadır (Lam vd., 2008). Gün ışığına erişim ve yapıların güneşlenme süresi, hem enerji etkinliği hem de kullanıcı konforu açısından bu bileşenlerin merkezinde bulunmaktadır (Strømman-Andersen & Sattrup, 2011).

Toplu konut alanları, kentsel ölçekte yüksek nüfus yoğunluğunu barındırmaları ve belirli tipoloji tekrarları içermeleri nedeniyle gün ışığı performansının en kritik olduğu yerleşim türlerinden biridir (Santamouris & Kolokotsa, 2015). Bina yükseklikleri, blok aralıkları, yönlenme kararları ve yerleşim düzeni gibi tasarım parametreleri, konut birimlerinin gün ışığından yararlanma düzeyini doğrudan etkilemektedir (Kamel vd., 2024). Yetersiz gün ışığına erişim; artan yapay aydınlatma ihtiyacı, enerji tüketiminde yükselme ve mekânsal konforun azalması gibi çok boyutlu sorunları beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, toplu konut alanlarında güneşlenme süresinin nicel olarak analiz edilmesi, sürdürülebilir kentsel tasarım kararlarının geliştirilmesinde önemli bir araçtır (Dervishaj & Gudmundsson, 2024).

Son yıllarda sayısal modelleme ve üç boyutlu (3B) kentsel analiz yöntemlerindeki gelişmeler, gün ışığı ve güneşlenme süresinin daha hassas ve görselleştirilebilir biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamıştır (Han vd., 2022). Üç boyutlu yapı modelleri üzerinden gerçekleştirilen güneş hareketi ve gölgeleme analizleri, yalnızca tekil yapı ölçeğinde değil, yerleşim bütünü ve çevresel bağlam içinde değerlendirme yapabilmeyi mümkün kılmaktadır (Deng vd., 2023; Uslu & Tuğcu, 2024). Bu yaklaşım, özellikle toplu konut alanlarında bina–bina etkileşimlerinin ve kentsel morfolojinin gün ışığı üzerindeki etkilerinin ortaya konulmasında önemli avantajlar sunmaktadır (Cao vd., 2021).

Bu çalışmada, toplu konut alanlarında gün ışığına erişimin değerlendirilmesi amacıyla, 3B dijital modeller üzerinden güneşlenme süresi analizlerine dayalı bir yaklaşım benimsenmiştir. Analiz sürecinde öncelikle çalışma alanına ait yapı kütleleri ve yerleşim düzeni sayısal ortamda oluşturulmuş; ardından coğrafi konum, tarih ve zaman parametreleri dikkate alınarak güneşlenme süresi hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım aracılığıyla, farklı bina cepheleri ve çatı yüzeylerinin yıl içindeki güneşlenme süreleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Çalışmanın temel amacı, toplu konut yerleşimlerinde gün ışığı performansının kentsel yerleşim kararlarıyla olan ilişkisini ortaya koymak ve sürdürülebilir kentleşme bağlamında güneşlenme süresinin bir performans göstergesi olarak nasıl kullanılabileceğini tartışmaktır. Bu kapsamda elde edilen bulguların, konut yerleşimlerinin planlama ve tasarım aşamalarında gün ışığı odaklı kararların geliştirilmesine katkı sağlaması hedeflenmektedir.

## 2. SÜRDÜRÜLEBİLİR KENTLEŞME VE GÜN IŞIĞINA DAYALI TASARIM YAKLAŞIMLARI

Sürdürülebilir kentleşme kavramı; çevresel koruma, ekonomik verimlilik ve sosyal eşitlik ilkelerinin dengeli biçimde ele alınmasını öngörmektedir (De Jong vd., 2015). Bu çerçevede, doğal kaynakların etkin kullanımı kent planlama ve tasarım süreçlerinin merkezinde yer almaktadır (Tan, vd., 2016). Gün ışığı, yenilenebilir ve sürekliliği olan bir doğal kaynak olarak, sürdürülebilir tasarımın temel bileşenlerinden biri kabul edilmektedir (Vadiyala, 2020).

Güneşlenme süresi, belirli bir zaman aralığında güneş ışınımının bir yüzeye aktardığı toplam enerji miktarını ifade eden temel bir ölçüttür (Almorox & Hontoria, 2004). Dünya Meteoroloji Örgütü'ne göre ise güneşlenme süresi, belirli bir periyot boyunca doğrudan güneş radyasyonunun  $120 \text{ W/m}^2$  eşliğinin üzerinde gerçekleştiği zaman dilimi olarak tanımlanmaktadır (Mohandes & Rehman, 2013).

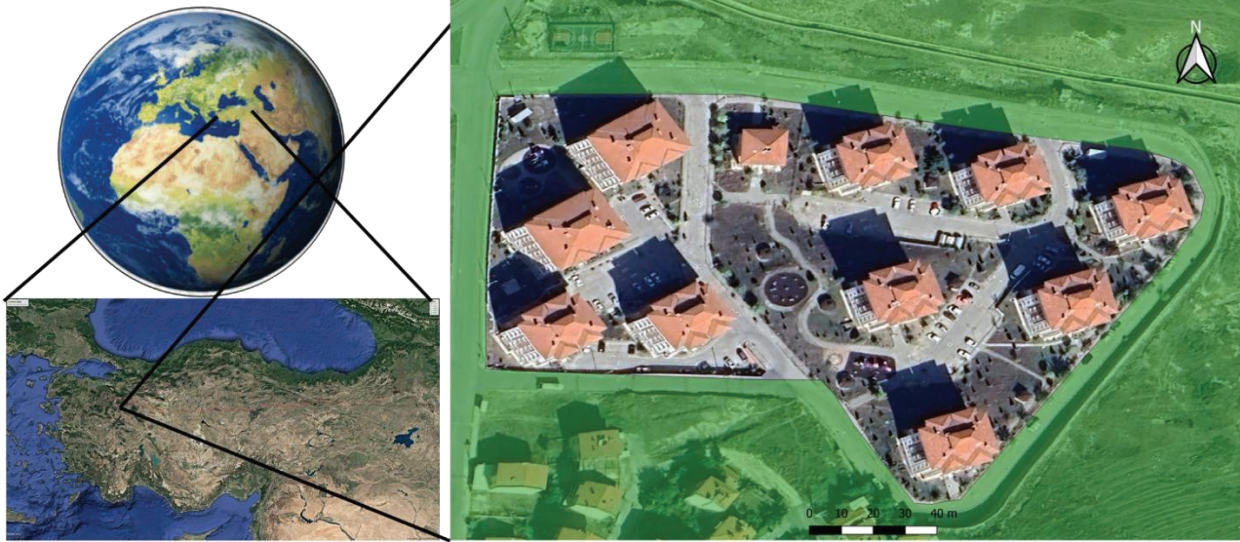
Literatürde, gün ışığına dayalı tasarım yaklaşımlarının enerji tüketimini %20–40 oranında azaltabildiği belirtilmektedir (Reinhart & Walkenhorst, 2001). Ayrıca yeterli gün ışığı alan konutların, kullanıcıların psikolojik ve fizyolojik sağlığı üzerinde olumlu etkiler yarattığı; uyku düzeni, ruh hâli ve genel yaşam memnuniyetini artırdığı vurgulanmaktadır (Mead, 2008).

Kentsel ölçekte gün ışığına erişim; yapı yönelmesi, blok yerleşim düzeni, kat yükseklikleri ve yapı yoğunluğu gibi mekânsal parametrelerle doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, güneşlenme süresi analizleri sürdürülebilir kentsel tasarım kararlarının bilimsel bir temele oturtulmasında kritik bir araç olarak değerlendirilmektedir (Sanaieian, vd., 2014; Liu vd., 2023).

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Çalışma Alanı

Araştırmada, Kütahya ili Tavşanlı ilçesi Dağçeşme Mahallesi'nde yer alan, altışar katlı betonarme on adet bloktan oluşan orta yoğunluklu bir kentsel alan çalışma alanı olarak belirlenmiştir. Alan, benzer yapı tipolojilerine sahip konut blokları ve bu bloklar arasında yer alan açık alanlardan oluşmaktadır. Yapılar, OpenStreetMap (OSM) verileri kullanılarak LoD 1 düzeyinde modellenmiş olup; yerleşim ölçeğinde gün ışığına erişim ve güneşlenme süresi analizleri için temsil edici bir örnek alan olarak değerlendirilmiştir. Şekil 1'de çalışma alanının coğrafi konumu gösterilmektedir.



Şekil 1. Çalışma alanının coğrafi konumu

#### 3.2. Çalışmanın Materyalleri

Bu çalışmada, toplu konut alanlarında gün ışığına erişim ve güneşlenme süresi, OpenStreetMap (OSM) kaynaklı LoD 1 düzeyindeki bina verileri kullanılarak analiz edilmiştir. Üç boyutlu sayısal modeller, SketchUp yazılımı ortamında oluşturulmuş ve SunHours eklentisi aracılığıyla güneşlenme süresi hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Analizler sayesinde yapı dizilişi, yoğunluk ve gölgeleme etkilerinin gün ışığı performansı üzerindeki rolü ortaya konulmuştur. Elde edilen bulgular

sürdürülebilir kentleşme bağlamında toplu konut yerleşimlerinde gün ışığını gözeten planlama ve tasarım kararlarının önemini vurgulamaktadır.

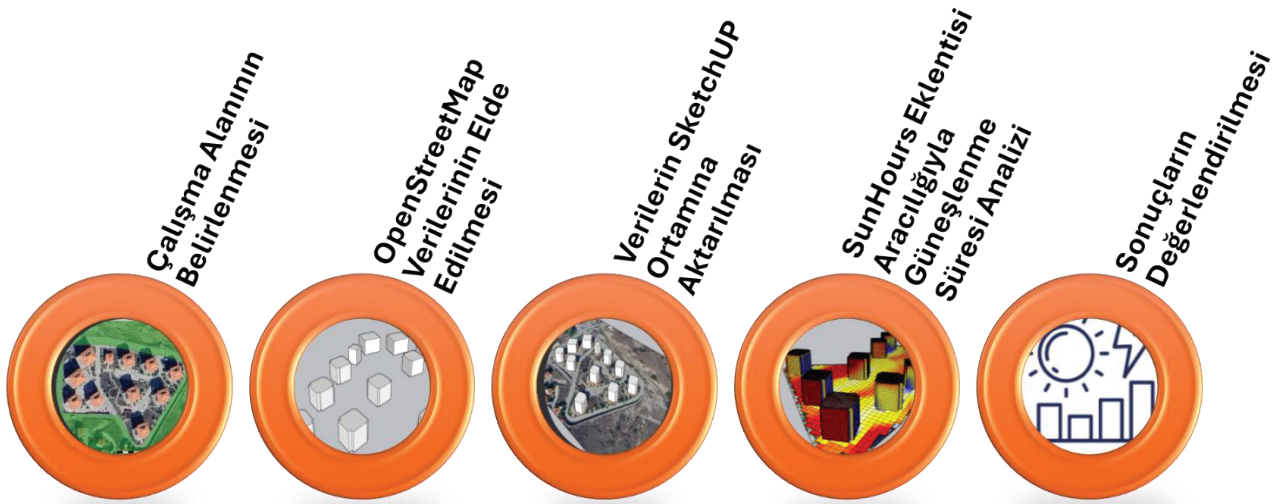
### 3.3. Çalışmanın Yöntemi

Bu çalışmada, toplu konut alanlarında gün ışığına erişimin değerlendirilmesi amacıyla, OpenStreetMap (OSM) tabanlı LoD 1 (Level of Detail 1) bina verileri kullanılarak 3B güneşlenme süresi analizleri gerçekleştirilmiştir. OSM, gönüllü coğrafi bilgi üretimine dayalı açık bir veri kaynağı olup, özellikle bina ayak izleri ve yükseklik bilgileri açısından kentsel ölçekte yaygın olarak kullanılmaktadır (Fan, 2014). Son yıllarda, OSM verilerinin kentsel analizlerde kullanımına yönelik çalışmalar, bu verilerin özellikle yerleşim ölçeğinde morfolojik ve çevresel analizler için yeterli doğruluk sunduğunu ortaya koymaktadır (Brovelli & Zamboni, 2018).

Literatürde üç boyutlu bina modelleri genellikle LoD 1, LoD 2 ve LoD 3 olmak üzere farklı ayrıntı düzeylerinde ele alınmaktadır. LoD 1 modeller, düz çatıya sahip prizmatik bina kütlelerini temsil etmekte olup, bina ayak izi ve yükseklik bilgisine dayanmaktadır (Bagheri vd., 2019). Bu düzey, çatı geometrisi ve cephe detaylarını içermemekle birlikte, gölgeleme etkileri, yapı yoğunluğu ve kentsel morfolojiye bağlı gün ışığı analizleri için tercih edilmektedir (Beltran-Velamazan vd., 2021). Bununla birlikte, yerleşim ölçeğinde gerçekleştirilen ve bina-bina etkileşimini esas alan çalışmalarda, LoD 1 modellerin analiz süresi, veri erişilebilirliği ve hesaplama maliyeti açısından önemli avantajlar sunduğu vurgulanmaktadır (Beltran-Velamazan vd., 2021; Pantazatou vd., 2023). Bu çalışma da, toplu konut alanlarında genel güneşlenme eğilimlerinin ortaya konulmasını amaçladığından, LoD 1 düzeyindeki bina verileri yöntemsel olarak yeterli kabul edilmiştir.

Bu bağlamda yöntem, OSM'den elde edilen LoD 1 bina geometrilerinin 3B ortama aktarılması, güneşlenme süresi analizlerinin gerçekleştirilmesi ve elde edilen çıktıların sürdürülebilir kentleşme perspektifinde yorumlanması aşamalarından oluşmaktadır.

Güneşlenme süresi analizleri, Tavşanlı ilçesinde yer alan toplu konut alanı için SketchUp SunHours eklentisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerde Tavşanlı'nın coğrafi konumu (39.54°K, 29.49°D) ve yerel zaman dilimi (UTC+3) esas alınmış, 1 Ocak–31 Aralık dönemine ait yıllık toplam güneşlenme süreleri hesaplanmıştır. SunHours analizlerinde Fit Grid parametresi ile cephe ve çatı yüzeyleri grid yapısına bölünmüş, Calculate Sunlight fonksiyonu kullanılarak bu yüzeylerin yıllık toplam doğrudan güneşlenme süreleri hesaplanmıştır. OSM verilerinden elde edilen LoD 1 düzeyindeki bina kütleleri üzerinden yürütülen analizlerde, gölgeleme etkileri yalnızca bina kütleleri dikkate alınarak değerlendirilmiş ve SunHours çıktıları günlük ortalama güneşlenme sürelerine dönüştürülmüştür. Buna ek olarak, analizlerde topografyanın düz kabul edilmesi, bitki örtüsü ve küçük kentsel elemanların modele dâhil edilmemesi, sonuçların gerçek koşulları kısmen sadeleştirilmiş biçimde yansıtmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte bu sınırlılık, çalışmanın amacına uygun olarak, yerleşim kurgusunun ve bloklar arası mesafenin güneşlenme süresi üzerindeki etkisini izole biçimde değerlendirmeyi mümkün kılmıştır. Şekil 2'de çalışmada uygulanan yöntemin işlem adımları gösterilmektedir.

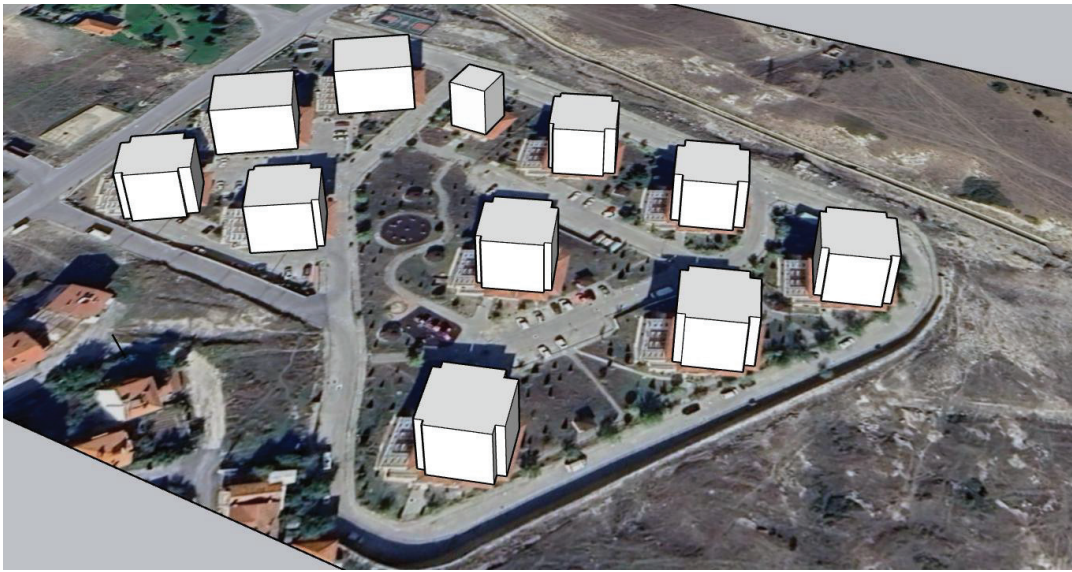


Şekil 2. Çalışmada uygulanan yöntemin işlem adımları

#### 4. BULGULAR

Bu bölümde, OpenStreetMap (OSM) verilerinden türetilen LoD 1 düzeyindeki bina modelleri üzerinden, SketchUp ortamında SunHours eklentisi kullanılarak elde edilen yıllık toplam güneşlenme süreleri değerlendirilmiştir. SunHours eklentisi yalnızca yıllık toplam değerler sunduğundan, cepheler ve çatı yüzeyleri arasında karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla bu değerler günlük ortalama güneşlenme sürelerine dönüştürülerek yorumlanmıştır.

Şekil 3, OpenStreetMap verilerinden elde edilen bina ayak izlerinin, SketchUp yazılımı kullanılarak LoD 1 düzeyinde üç boyutlu kütlelere dönüştürülmesini göstermektedir. Analizlerde topografya düz kabul edilmiş, bitki örtüsü ve küçük kentsel elemanlar modele dâhil edilmemiştir.



Şekil 3. LoD 1 bina kütlelerinin SketchUp ortamında modellenmesi

Şekil 4 ve Şekil 5, cephe ve çatı yüzeyleri ile açık alanlara ait yıllık toplam güneşlenme sürelerinin mekânsal dağılımını göstermektedir. Toplu konut alanına ilişkin güneşlenme süreleri, yıllık toplam

güneşlenme saatlerine göre dört sınıfta değerlendirilmiş ve sonuçlar renk skalası aracılığıyla mekânsal olarak yorumlanmıştır. Bu sınıflandırma, cephelerin gün ışığına erişim düzeylerini açık ve karşılaştırılabilir bir biçimde ortaya koymaktadır. Bu kapsamda güneşlenme süreleri; 0–548 saat (mavi), 548–1097 saat (sarı), 1097–1645 saat (turuncu) ve 1645–2194 saat (kırmızı) aralıklarında gruplandırılmıştır. Renk skalası, düşükten yükseğe doğru güneşlenme süresindeki değişimi ifade etmektedir.

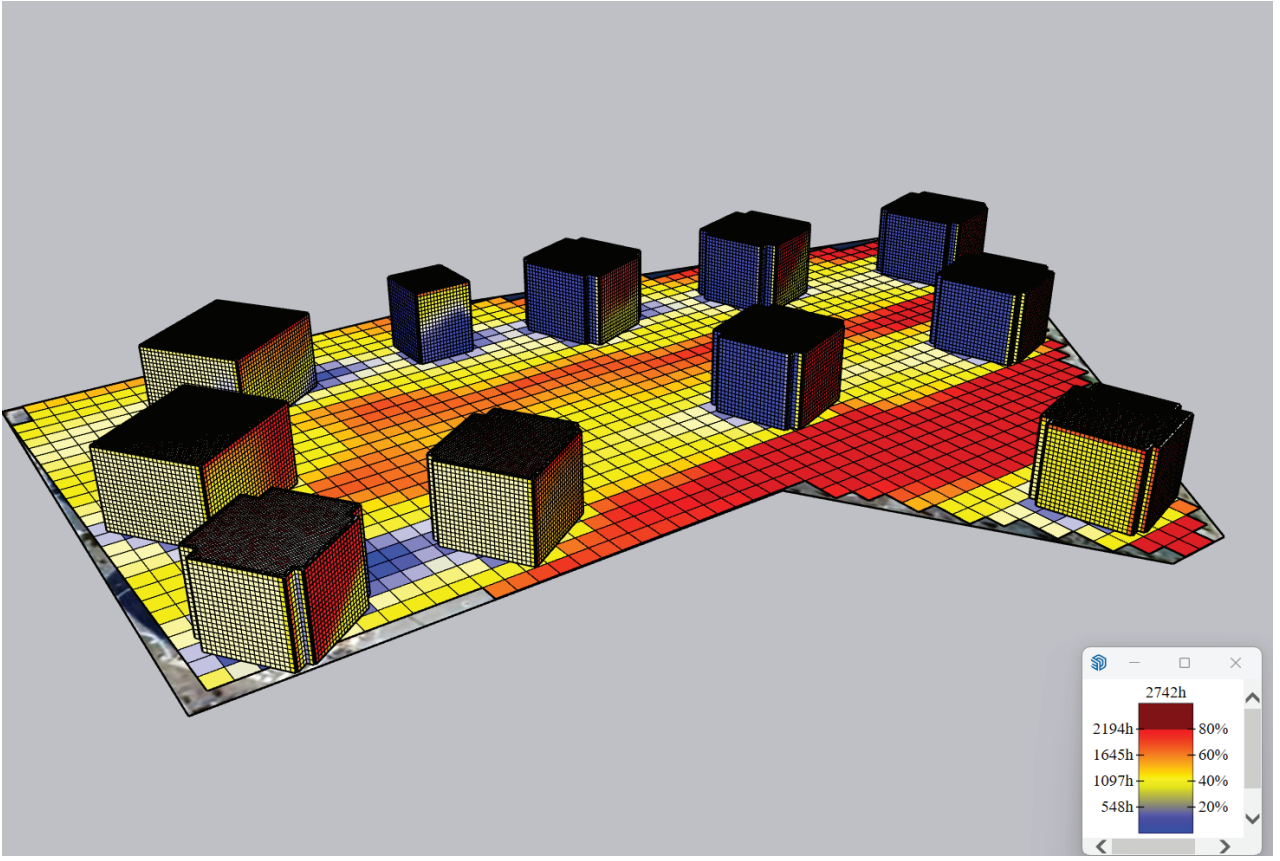
Kuzey yönlü cephelerin büyük bir bölümünün 0–548 saat aralığında yer aldığı ve bu nedenle mavi renk skalasıyla temsil edildiği görülmektedir. Bu durum, kuzey cephelerin yıl boyunca doğrudan güneş ışığına sınırlı ölçüde maruz kalmasının doğal bir sonucudur. Özellikle alt katlarda bulunan kuzey cepheli birimlerde güneşlenme süresi, çevredeki yapıların gölgeleme etkisiyle daha da azalmaktadır.

Doğu cephelerde güneşlenme sürelerinin ağırlıklı olarak 548–1097 saat aralığında yoğunlaştığı ve bu nedenle sarı renk skalasında temsil edildiği belirlenmiştir. Doğu yönlü cepheler, sabah saatlerinde doğrudan güneş ışığı almakta; ancak günün ilerleyen saatlerinde güneşlenme süresi hızla azalmaktadır. Bu cephelerde orta düzeyde bir güneşlenme potansiyeli söz konusudur. Sabah saatlerindeki güneş kazanımları, özellikle konut kullanımında mekânsal konfor açısından olumlu bir etki yaratırken, yıl geneline yayılan toplam süre bakımından sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle doğu cepheler, dengeli ancak görece sınırlı bir gün ışığı erişimine sahip olarak değerlendirilmektedir.

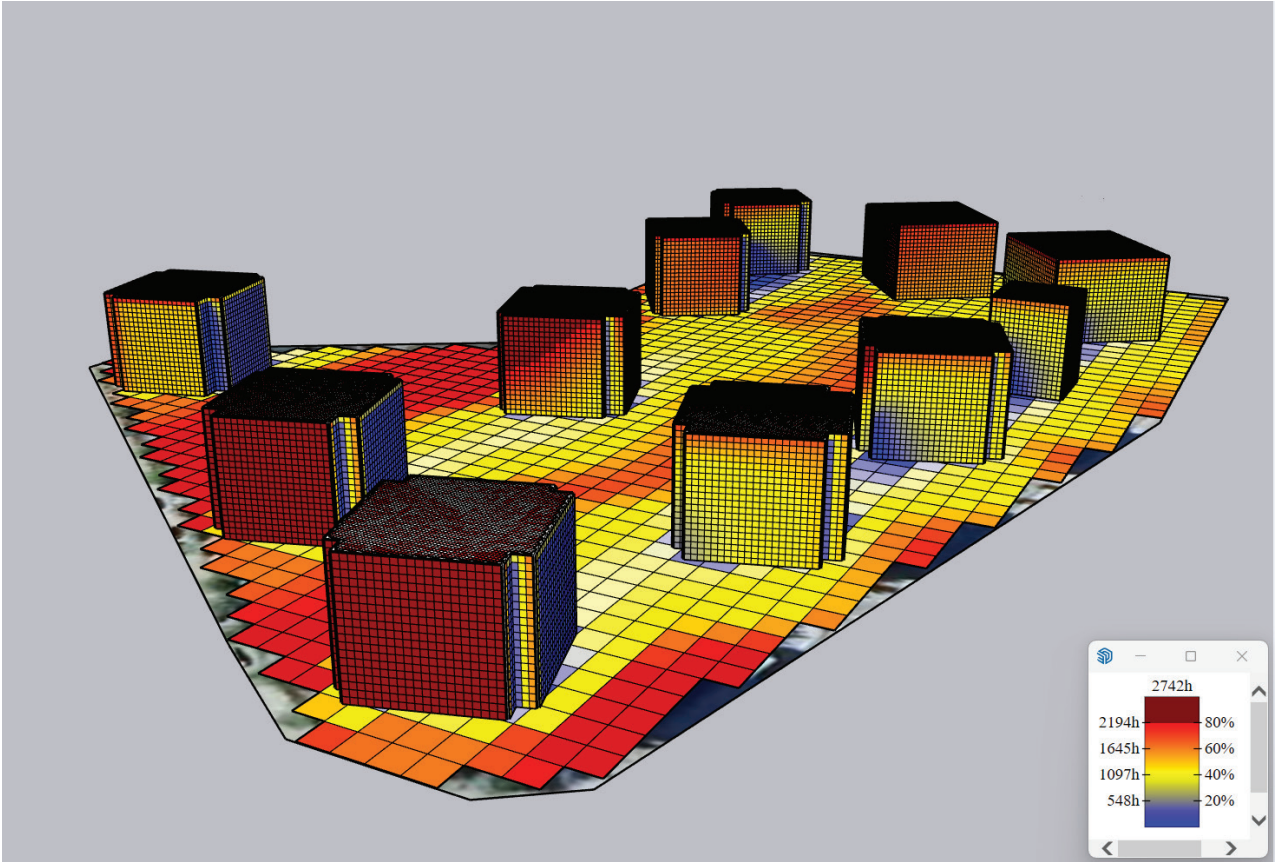
Batı yönlü cephelerde güneşlenme sürelerinin büyük ölçüde 1097–1645 saat aralığında yer aldığı ve turuncu renk skalasıyla temsil edildiği görülmektedir. Bu cepheler, özellikle öğleden sonra ve akşam saatlerinde yoğun güneş ışığına maruz kalmaktadır. Batı cephelerde gözlenen yüksek güneşlenme süreleri, gün ışığı erişimi açısından avantaj sağlamakla birlikte, yaz aylarında aşırı ısınma riskini de beraberinde getirmektedir. Dolayısıyla bu cephelerde yüksek güneşlenme süresi, tek başına olumlu bir gösterge olarak değil; gölgeleme elemanları ve pasif iklimlendirme stratejileri ile birlikte değerlendirilmesi gereken bir bulgu olarak ele alınmalıdır.

Güney yönlü cephelerin büyük bir kısmının 1645–2194 saat aralığında yer aldığı ve kırmızı renk skalasıyla temsil edildiği tespit edilmiştir. Bu sonuç, güney cephelerin yıl boyunca en yüksek ve en dengeli güneşlenme süresine sahip olduğunu açık biçimde ortaya koymaktadır. Güney cephelerde güneşlenmenin gün içine ve mevsimlere daha homojen dağıldığı görülmektedir. Bu durum, hem doğal aydınlatma hem de pasif güneş kazancı açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. Bulgular, güney yönlü cephelerin sürdürülebilir toplu konut tasarımında öncelikli olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Renk skalasına dayalı analiz sonuçları, cephe yönelimi ile güneşlenme süresi arasında belirgin ve sistematik bir ilişki bulunduğunu ortaya koymaktadır. Mavi ve sarı renklerle temsil edilen düşük ve orta düzey güneşlenme süreleri ağırlıklı olarak kuzey ve doğu cephelerde yoğunlaşırken, turuncu ve kırmızı renkler batı ve güney cephelerde baskın hâle gelmektedir. Bu mekânsal dağılım, toplu konut alanlarında cephe yöneliminin yalnızca mimari bir tercih değil, aynı zamanda enerji verimliliği, kullanıcı konforu ve sürdürülebilirlik açısından stratejik bir karar olduğunu göstermektedir. Bu cephelerde gözlenen düşük güneşlenme süreleri, doğal aydınlatma düzeyinin yetersizliği ve artan yapay aydınlatma ihtiyacı ile ilişkilendirilebilir. Bulgular, kuzey cephelerin sürdürülebilir tasarım açısından kritik bir dezavantaj taşıdığını ortaya koymaktadır.



Şekil 4. Güneybatı cephesine göre güneşlenme sürelerinin karşılaştırılması



Şekil 5. Kuzeydoğu cephesine göre güneşlenme sürelerinin karşılaştırılması

Toplu konut yerleşimlerinde bloklar arası mesafe, yapıların birbirleri üzerinde oluşturduğu gölgeleme miktarını doğrudan belirleyen temel mekânsal parametrelerden biridir. Özellikle benzer yükseklik ve

kat sayısına sahip blokların yakın konumlandırılması durumunda, güneşin düşük açıyla geldiği sabah ve akşam saatlerinde gölgeleme etkisi belirgin şekilde artmaktadır. Bu çalışmada incelenen altı katlı konut blokları arasında yer yer 10–50 m arasında değişen mesafeler bulunmakta olup, bloklar arası mesafenin azaldığı alanlarda hem cephelerin hem de açık alanların yıllık toplam güneşlenme sürelerinin düştüğü belirlenmiştir. Özellikle kuzey cephelerde ve dar blok aralıklarında kalan açık alanlarda, gölgede kalma süresinin belirgin biçimde uzadığı gözlemlenmiştir.

Bloklar arası mesafe, toplu konut yerleşimlerinde gölgeleme etkisini doğrudan belirleyen temel bir mekânsal parametredir. Blokların birbirine yakın konumlandığı alanlarda, özellikle güneşin düşük açılarla geldiği saatlerde gölgeleme artmakta; bu durum cephelerin ve açık alanların güneşlenme sürelerini azaltmaktadır. Buna karşılık, bloklar arası mesafenin arttığı yerleşimlerde gölgeleme etkisi azalmakta ve hem bina cepheleri hem de açık alanlar daha uzun süre gün ışığından yararlanabilmektedir. Bloklar arası mesafenin yetersiz olduğu alanlarda gölgeleme etkisi artmakta, bu durum özellikle kuzey cepheler ve dar açık alanlarda güneşlenme sürelerinin belirgin biçimde azalmasına neden olmaktadır.

Cephe yönlerine bağlı olarak hesaplanan yıllık toplam güneşlenme süreleri Tablo 1’de sunulmuştur. Bu değerler, yerleşimdeki yönelim etkisini ortaya koymak amacıyla değerlendirilmiştir.

**Tablo 1.** Cephe yönlerine göre yıllık toplam güneşlenme süreleri

| Cephe yönü | Ortalama (saat/yıl) |
|------------|---------------------|
| Güney      | 1919,5              |
| Doğu       | 822,5               |
| Batı       | 1371                |
| Kuzey      | 274                 |

Tablo 1, farklı bloklardaki aynı yönlü cephelerin yıllık toplam güneşlenme sürelerinin ortalamasını göstermektedir. Sonuçlar, güney cephelerin açık biçimde en yüksek güneşlenme süresine sahip olduğunu, kuzey cephelerin ise belirgin şekilde daha düşük değerler sunduğunu ortaya koymaktadır. Doğu ve batı cepheler arasında görece sınırlı bir fark bulunması, yerleşimdeki blok dizilişinin simetrik ve düzenli olmasına bağlanabilir.

Tablo 2, SunHours eklentisinin ürettiği yıllık toplam güneşlenme sürelerinin, karşılaştırmalı yorumlamayı kolaylaştırmak amacıyla günlük ortalama değerlere dönüştürülmesiyle elde edilmiştir. Bu dönüşüm, farklı cephelerin gün içindeki görece performanslarının daha anlaşılır biçimde sunulmasını sağlamaktadır.

**Tablo 2.** Cephe yönlerine göre hesaplanan günlük ortalama güneşlenme süreleri

| Cephe yönü | Ortalama (saat/gün) |
|------------|---------------------|
| Güney      | 5,26                |
| Doğu       | 2,25                |
| Batı       | 3,76                |
| Kuzey      | 0,75                |



Bu sonuçlara göre, kuzey cephelerin günlük ortalama güneşlenme süresi 1 saatin altında kalırken, güney cephelerde bu değer 5 saatin üzerine çıkmaktadır. Doğu ve batı cepheler ise sırasıyla yaklaşık 2–4 saat/gün aralığında orta düzey güneşlenme potansiyeline sahiptir. Bu dağılım, cephe yöneliminin gün ışığına erişimde belirleyici bir faktör olduğunu ve sürdürülebilir toplu konut tasarımında güneşlenme süresine dayalı yönelme kararlarının kritik önem taşıdığını ortaya koymaktadır.

Elde edilen bulgular, LoD 1 düzeyindeki OSM verileri kullanılarak oluşturulan basit kütleli modellerin, yerleşim ölçeğinde güneşlenme sürelerinin karşılaştırmalı analizinde yeterli doğruluk sağladığını göstermektedir. SketchUp SunHours eklentisi ile elde edilen yıllık toplam değerler, uygun dönüştürme yaklaşımlarıyla birlikte kullanıldığında, sürdürülebilir kentleşme bağlamında erken planlama ve tasarım kararlarını destekleyen güçlü bir analiz aracı sunmaktadır.

## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma, OpenStreetMap (OSM) verilerinden elde edilen LoD 1 düzeyindeki bina modelleri kullanılarak, toplu konut alanlarında gün ışığına erişim ve güneşlenme süresinin mekânsal bileşenlerle ilişkisini ortaya koymayı amaçlamıştır. SketchUp ortamında SunHours eklentisi ile gerçekleştirilen analizler, basit kütleli modellerin yerleşim ölçeğinde güneşlenme performansını değerlendirmede etkili ve uygulanabilir bir yöntem sunduğunu göstermektedir.

Elde edilen sonuçlar, çatı yüzeylerinin tüm bloklarda cephelere kıyasla daha yüksek güneşlenme sürelerine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgu, çatıların çevresel gölgelemeden daha az etkilenmesi ve güneş ışınımına daha doğrudan maruz kalmasıyla açıklanabilir. Cephe yönlerine göre yapılan değerlendirmede ise güney cephelerin en yüksek, kuzey cephelerin ise en düşük güneşlenme sürelerine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum, literatürde vurgulanan yönelim–gün ışığı ilişkisiyle uyumludur ve konut tasarımında yönelimin temel bir belirleyici olduğunu bir kez daha ortaya koymaktadır.

Çalışmanın önemli bulgularından biri, bloklar arası mesafenin gölgeleme etkisi üzerindeki belirleyici rolüdür. Blokların birbirine yaklaştığı alanlarda, özellikle cephelerde ve yerleşim içindeki dar açık alanlarda güneşlenme sürelerinin belirgin biçimde azaldığı tespit edilmiştir. Buna karşılık, bloklar arası mesafenin arttığı veya güney yönlü açık alanların bulunduğu yerleşim kurgularında güneşlenme performansının anlamlı ölçüde iyileştiği görülmüştür. Bu sonuç, yapı yoğunluğu ile gün ışığına erişim arasındaki dengeye dikkat çekmektedir.

Literatürde yer alan birçok çalışmada, yüksek detaylı bina modellerinin (LoD 2 ve üzeri) daha hassas sonuçlar ürettiği belirtilmekle birlikte, bu çalışma LoD 1 düzeyindeki OSM verilerinin erken planlama ve karşılaştırmalı analizler için yeterli doğruluk sağladığını göstermektedir. Bu yönüyle çalışma, veri erişiminin sınırlı olduğu kentsel alanlar için pratik ve tekrarlanabilir bir analiz yaklaşımı sunmaktadır.

Sonuç olarak, toplu konut alanlarında sürdürülebilir kentleşme hedeflerine ulaşılabilmesi için, blok dizilişi, cephe yönelimi ve bloklar arası mesafe gibi mekânsal parametrelerin gün ışığına erişimi gözeten bir yaklaşımla ele alınması gerekmektedir. SketchUp SunHours eklentisi ile desteklenen bu analiz kurgusu, hem kentsel tasarım hem de planlama süreçlerinde karar vericilere erken aşamada yol gösterici bir araç olarak değerlendirilebilir. SunHours eklentisi, doğrudan güneş ışığına maruz kalma süresini hesaplayan pratik ve erişilebilir bir araç olmakla birlikte, bazı sınırlılıklara sahiptir. Öncelikle SunHours çıktıları, küresel veya difüz güneş radyasyonu değerlerini içermemekte, yalnızca doğrudan

güneşlenme süresini saat cinsinden sunmaktadır. Bu nedenle elde edilen sonuçlar, enerji üretim potansiyeli ya da iç mekân aydınlatma düzeyi gibi ileri düzey analizlerle doğrudan eşleştirilemez.

Bu çalışmadan elde edilen bulgular doğrultusunda, toplu konut alanlarında gün ışığına erişimi artırmaya yönelik planlama ve tasarım önerileri aşağıda maddeler hâlinde sunulmuştur:

- Bloklar arası mesafe artırılmalıdır. Özellikle benzer yükseklik ve kat sayısına sahip yapıların yakın konumlandırılması, gölgeleme etkisini artırmakta ve cephelerin güneşlenme süresini azaltmaktadır. Bu nedenle, bloklar arası mesafenin yapı yüksekliğiyle orantılı olarak belirlenmesi önerilmektedir.
- Güney yönelimli yerleşim kurguları teşvik edilmelidir. Güney cephelerin diğer yönlere kıyasla daha yüksek güneşlenme süresi sunduğu göz önüne alındığında, konut bloklarının mümkün olduğunca güney yönlü açık alanlara bakacak şekilde konumlandırılması önem taşımaktadır.
- Açık alanlar güneşlenme süreleri dikkate alınarak tasarlanmalıdır. Bloklar arası açık alanların yalnızca sosyal kullanım açısından değil, gün ışığına erişim bakımından da değerlendirilmesi; dar ve gölgede kalan alanlardan kaçınılması gerekmektedir.
- Erken tasarım aşamalarında güneşlenme analizleri yapılmalıdır. Basit kütleli modeller ve erişilebilir analiz araçları kullanılarak, yerleşim kararları kesinleşmeden önce gün ışığı performansının değerlendirilmesi, ileride oluşabilecek mekânsal ve çevresel sorunların önüne geçilmesini sağlayacaktır.

Bu çalışma, yerleşim ölçeğinde gün ışığına erişimin değerlendirilmesine yönelik önemli bulgular sunmakla birlikte, bazı sınırlılıklar içermektedir. Bu sınırlılıklar aynı zamanda gelecekte yapılacak çalışmalar için araştırma alanları oluşturmaktadır. Gelecekteki çalışmalarda topografik verilerin, bitki örtüsünün ve kentsel donatıların modele dâhil edilmesiyle, gerçek kentsel koşulları daha iyi yansıtan çok ölçekli analizler yapılabilir. Bu tür bütünlük yaklaşım, toplu konut alanlarında gün ışığına erişimin yalnızca bina kütle düzeniyle değil, çevresel ve doğal faktörlerle birlikte ele alınmasını sağlayacaktır. Gelecek çalışmalarda, LiDAR veya fotogrametrik veriler kullanılarak elde edilecek LoD 2 veya LoD 3 düzeyindeki bina modelleri, çatı geometrilerinin (eğim, yönelim, mahya yapısı) ve cephe detaylarının daha doğru temsil edilmesine olanak sağlayacaktır. Bu sayede, özellikle çatı yüzeylerinde güneşlenme süresi ve potansiyel kullanım alanlarının daha hassas biçimde değerlendirilmesi mümkün olacaktır.

Sonuç olarak bu çalışma, basit kütleli modeller ve erişilebilir analiz araçlarıyla, toplu konut alanlarında gün ışığına erişimin planlama ve tasarım kararları üzerindeki etkisini ortaya koyarak, sürdürülebilir kentleşme literatürüne katkı sunmaktadır.

**KAYNAKÇA**

- Almorox, J. Y., & Hontoria, C. J. E. C. (2004). Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain. *Energy Conversion and Management*, 45(9-10), 1529-1535.
- Beltran-Velamazan, C., Monzón-Chavarrías, M., & López-Mesa, B. (2021). A method for the automated construction of 3D models of cities and neighborhoods from official cadaster data for solar analysis. *Sustainability*, 13(11), 6028.
- Bagheri, H., Schmitt, M., & Zhu, X. (2019). Fusion of multi-sensor-derived heights and OSM-derived building footprints for urban 3D reconstruction. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(4), 193.
- Brovelli, M. A., & Zamboni, G. (2018). A new method for the assessment of spatial accuracy and completeness of OpenStreetMap building footprints. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(8), 289.
- Cao, Q., Luan, Q., Liu, Y., & Wang, R. (2021). The effects of 2D and 3D building morphology on urban environments: A multi-scale analysis in the Beijing metropolitan region. *Building and Environment*, 192, 107635.
- De Jong, M., Joss, S., Schraven, D., Zhan, C., & Weijnen, M. (2015). Sustainable-smart-resilient-low carbon-eco-knowledge cities; making sense of a multitude of concepts promoting sustainable urbanization. *Journal of Cleaner production*, 109, 25-38.
- Dervishaj, A., & Gudmundsson, K. (2025). Sunlight Autonomy for Buildings: A New Methodology for Evaluating Sunlight Performance in Urban and Architectural Design. *Leukos*, 21(1), 34-64.
- Deng, Z., Chen, Y., Yang, J., & Causone, F. (2023). AutoBPS: A tool for urban building energy modeling to support energy efficiency improvement at city-scale. *Energy and Buildings*, 282, 112794.
- Fan, H., Zipf, A., Fu, Q., & Neis, P. (2014). Quality assessment for building footprints data on OpenStreetMap. *International Journal of Geographical Information Science*, 28(4), 700-719.
- Han, J. Y., Chen, Y. C., & Li, S. Y. (2022). Utilising high-fidelity 3D building model for analysing the rooftop solar photovoltaic potential in urban areas. *Solar energy*, 235, 187-199.
- Kamel, T. M., Khalil, A., Lakousha, M. M., Khalil, R., & Hamdy, M. (2024). Optimizing the view percentage, daylight autonomy, sunlight exposure, and energy use: data-driven-based approach for maximum space utilization in residential building stock in hot climates. *Energies*, 17(3), 684.
- Lam, J. C., Wan, K. K., Tsang, C. L., & Yang, L. (2008). Building energy efficiency in different climates. *Energy Conversion and Management*, 49(8), 2354-2366.
- Liu, K., Xu, X., Huang, W., Zhang, R., Kong, L., & Wang, X. (2023). A multi-objective optimization framework for designing urban block forms considering daylight, energy consumption, and photovoltaic energy potential. *Building and Environment*, 242, 110585.
- Mead, M. N. (2008). Benefits of sunlight: a bright spot for human health. *Environmental health perspectives*, 116(4), A160.

- Mohandes, M. A., & Rehman, S. (2013). Estimation of sunshine duration in Saudi Arabia. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 5(3).
- Pantazatou, K., Kanters, J., Olsson, P. O., Nyborg, J. L., & Harrie, L. (2023). Input data requirements for daylight simulations in urban densifications. *Urban Informatics*, 2(1), 2.
- Reinhart, C. F., & Walkenhorst, O. (2001). Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds. *Energy and buildings*, 33(7), 683-697.
- Sanaieian, H., Tenpierik, M., Van Den Linden, K., Seraj, F. M., & Shemrani, S. M. M. (2014). Review of the impact of urban block form on thermal performance, solar access and ventilation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 551-560.
- Santamouris, M., & Kolokotsa, D. (2015). On the impact of urban overheating and extreme climatic conditions on housing, energy, comfort and environmental quality of vulnerable population in Europe. *Energy and Buildings*, 98, 125-133.
- Strømmand-Andersen, J., & Sattrup, P. A. (2011). The urban canyon and building energy use: Urban density versus daylight and passive solar gains. *Energy and buildings*, 43(8).
- Tan, Y., Xu, H., & Zhang, X. (2016). Sustainable urbanization in China: A comprehensive literature review. *Cities*, 55, 82-93.
- UN-HABITAT. (2024). *World cities report 2024: Cities and climate action*. Stylus Publishing, LLC.
- Uslu, A., & Tuğcu, A. (2024). Sürdürülebilir Binalar İçin Güneşlenme Süresinin 3B Modellenmesi ve Simülasyonu Üzerine Bir Araştırma. *Kirklareli University Journal of Engineering and Science*, 10(2), 387-401.
- Vadiyala, V. R. (2020). Sunlight to Sustainability: A Comprehensive Analysis of Solar Energy's Environmental Impact and Potential. *Asia Pacific Journal of Energy and Environment*, 7(2), 103-110.

# Bölüm 8

## FONKSİYONEL VE SÜRDÜRÜLEBİLİR TEKSTİL YÜZEYLERİ İÇİN YENİLİKÇİ DOĞAL BOYAMA YAKLAŞIMLARI

*Gamze GÜLŞEN BAKICI<sup>1</sup>, Deniz Mutlu ALA<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Doç.Dr.Gamze GÜLŞEN BAKICI (ORCID:0000-0002-4241-7096)

<sup>2</sup> Doç.Dr.Deniz Mutlu ALA (ORCID:000000025864308X)

Çukurova Üniversitesi, Adana Organize Sanayi Bölgesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu,  
Tekstil Giyim Ayakkabı ve Deri Bölümü

## 1. GİRİŞ

### 1.1. Hızlı moda endüstrisi ve çevresel sürdürülebilirlik sorunları

Hızlı moda, güncel trendleri çok kısa sürede ve düşük maliyetle piyasaya sunmayı hedefleyen, yüksek tempolu bir üretim ve tüketim modelidir. Kısa tedarik süreleri, seri üretim ve hızlı koleksiyon yenileme bu sistemin temel özellikleridir. Geleneksel moda anlayışına kıyasla yeni ürünler tüketiciyle çok daha hızlı buluşmakta, bu durum moda döngülerini kısaltarak aşırı ve bilinçsiz tüketimi teşvik etmektedir. Artan tüketim; doğal kaynak kullanımı, arazi baskısı, sera gazı salınımları ve su kirliliğinde önemli artışlara yol açmaktadır. Bu nedenle, moda sektörü de dâhil olmak üzere sorumlu tüketim yaklaşımlarının benimsenmesi iklim kriziyle mücadelede kritik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır (Aponte vd., 2024).

Tekstil sektörü, Bangladeş, Sri Lanka, Vietnam ve Hindistan gibi gelişmekte olan ülkelerde istihdam ve döviz girdisi sağlayarak ekonomiye katkı sunsa da, kimyasal süreçlerin yetersiz denetlenmesi ciddi çevresel sorunlara yol açmaktadır. Her yıl yaklaşık 10.000 farklı ticari boyanın üretildiği ve bunların önemli bir kısmının yüzey sularına karıştığı bildirilmektedir. Orta ölçekli bir tekstil tesisinin yüksek miktarda su tüketmesi ve boyama ile terbiye işlemlerinin endüstriyel su kirliliğinde önemli paya sahip olması, sektörün çevresel etkilerini daha da artırmaktadır. Bu durum, tekstil endüstrisini sürdürülebilirlik açısından önemli bir çevresel sorun alanı hâline getirmektedir (Islam vd., 2025).

### 1.2. Sentetik boyaların karbon ayak izi ve toksik etkileri

Tekstil renklendirmesinde tehlikeli sentetik boyaların giderek artan kullanımı, insan sağlığı ve çevre üzerindeki etkileri açısından ciddi endişelere yol açmıştır. Küresel ölçekte tekstil uygulamalarında 10.000'den fazla farklı sentetik boya ve kimyasalın kullanıldığı ve toplam miktarın 700.000 tonu aştığı bildirilmektedir. Yaygın olarak kullanılan doğal bir lif olan pamuk, ağırlıklı olarak reaktif boya ile boyanmakta; bu durum, farklı renklerin elde edilebilmesi için çok sayıda sentetik boyanın kullanımını gerektirdiğinden önemli bir çevresel ayak izi oluşturmaktadır (Hossain vd., 2023).

Günümüzde sentetik boyalar, hızlı ve tutarlı renklendirme, geniş renk yelpazesi, kolay uygulanabilirlik, yüksek stabilite ve düşük enerji gereksinimi gibi avantajları sayesinde tekstil endüstrisinde yaygın kullanılmakta ve küresel boya pazarının yaklaşık %75'ini oluşturmaktadır. Ancak yapılan çalışmalar, uygulanan boyaların %15'ine kadar olan kısmının liflere bağlanmadan atık suya geçtiğini ve boyama, fikse etme ile yıkama işlemlerinin çok yüksek miktarda su tüketimine neden olduğunu göstermektedir. Bu süreçler sonucunda oluşan atık sular; yüksek BOİ ve KOİ değerlerinin yanı sıra klorlu bileşikler, ağır metaller, kükürt, nitratlar, naftoller, sabunlar, krom bileşikleri, formaldehit, benzidin, şelatlayıcı ajanlar ile boya ve pigmentler gibi çok sayıda organik ve inorganik kirletici içermektedir. Bazı toksik bileşenlerin arıtma sonrası dahi suda kalabilmesi, bu atık suların hava, toprak, bitkiler ve su kaynaklarında çoklu kirlenmeye ve ciddi sağlık sorunlarına yol açmasına neden olmaktadır (Slama vd., 2021; Taha ve Gouda, 2025; Baaka vd., 2023).

Tekstil endüstrilerinden deşarj edilen sıvı ve katı atıklar sebebiyle toprakta meydana gelen kirlilik; bitkilerde oksidatif strese yol açarak bitki gelişimini baskılamakta, protein içeriğini azaltmakta, fotosentez hızını ve CO<sub>2</sub> asimilasyon oranlarını düşürmektedir. Bu olumsuz etkiler, tarımsal verimliliğin azalmasına ve ekosistem dengesinin bozulmasına neden olmaktadır (Slama vd., 2021).

Tekstil boya endüstrileri; kükürt, formaldehit, azot oksitleri, uçucu bileşikler, partikül madde ve tozlar gibi hoş olmayan kokuya sahip toksik gazları atmosfere salmaktadır. Bu tür hava kirliliği, başta insanlar (çalışanlar ve tüketiciler) olmak üzere hayvanları, nihai ürünleri ve genel olarak çevreyi olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Slama vd., 2021).

Endüstriyel boyalar içeren atık suların en ciddi etkileri, denizler, nehirler, göller ve akarsular gibi alıcı su ortamlarında ortaya çıkmakta ve bu etkiler geniş alanlara yayılarak sucul ekosistemlere zarar vermektedir. Farklı renklere sahip boyaların deşarjından kaynaklanan bu atık sular, çok sayıda toksik bileşen içermektedir. Boyalar, 1 mg/L gibi çok düşük konsantrasyonlarda dahi algılanabilir ve zor parçalanabilir nitelikteyken, tekstil atık sularındaki konsantrasyonları ortalama 300 mg/L'ye kadar

ulaşabilmektedir. Atık suların koyu rengi ve yüksek bulanıklığı, güneş ışığının suya nüfuzunu engelleyerek çözünmüş oksijen seviyelerini düşürmekte ve pH dengesini bozmakta; bu durum sucul bitkilerde fotosentezin baskılanmasına, mikroorganizmalar tarafından düşük biyobozunurluğa ve besin zinciri üzerinde olumsuz etkilere yol açmaktadır (Slama vd., 2021). Tekstil atık sularında ve yeraltı sularında bulunabilen kimyasallar Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Tekstil atık sularında ve yeraltı sularında bulunabilen kimyasallar (Islam vd., 2025).

| Kimyasal / Kirletici Madde  | Kullanım Aşaması   | Hedef Organlar ve Sağlık Etkileri   |
|---|--|---|
| <b>Formaldehit</b>  | Kumaş ve tekstillerin buruşmaz, çekmez ve su itici hale getirilmesi (apre işlemleri) | Cilt irritasyonu, alerjik dermatit, solunum yolu tahrişi (öksürük, hırıltı, boğaz ağrısı, nefes darlığı), astım atakları, göz irritasyonu                   |
| <b>Klorlu çözücüler (Trikloroetan – TCE)</b>                          | Kumaş ağartma ve ön işlem  | Merkezi sinir sistemi, karaciğer ve böbrek hasarı; atmosferik süreçleri bozarak ozon tabakasına zarar   |
| <b>Karbon disülfid (CS<sub>2</sub>)</b>                               | Viskon (rayon) liflerinin üretimi  | Nörolojik ve psikiyatrik bozukluklar, gastrointestinal ve cinsel problemler, üreme toksisitesi, doğum kusurları, lösemi, kronik cilt ve böbrek hastalıkları |
| <b>Gümüş ve nano gümüş bileşikler</b>                                 | Antimikrobiyal ve antibakteriyel apre işlemleri                                      | Bakteriyel direnç gelişimi, ekotoksosite; akciğer ve sinir hücreleri üzerinde toksik etki   |
| <b>Klorlu parafinler (SCCPs) (Kalıcı Organik Kirleticiler – POPs)</b> | Alev geciktirici; askeri, su geçirmez ve çürümeye dayanıklı ağır tekstiller          | Biyobirikim, sucul canlılara toksisite, endokrin bozucu etki; böbrek, karaciğer ve tiroid hasarı  |
| <b>Dioksinler</b>   | Koruyucu işlemler, ağartma ve boya üretimi   | Akciğer ve karaciğer kanseri, diyabet, kardiyovasküler hastalıklar, erken menopoz, endometriozis, testosteron ve tiroid hormonlarında azalma                |
| <b>Organotin bileşikler (DBT, TBT, TPHT)</b>                          | Biyosit; ağır hizmet tekstillerinde koku oluşumunu azaltma                           | Bağışıklık ve üreme sistemi hasarı; cilt, göz ve mukozalarda ciddi irritasyon   |
| <b>Klorofenoller</b>  | Ağır hizmet tekstillerinde koruyucu ve fungusit                                      | Sinir sistemi, böbrekler, kan, karaciğer ve gözler üzerinde toksik etki   |
| <b>Toluen, metil izobütil keton, ksilen, metil etil keton</b>         | Tekstil baskı ve kurutma işlemlerinde solvent bazlı mürekkepler                      | Mesleki maruziyet riski; cilt ve göz irritasyonu, baş dönmesi, mide bulantısı, baş ağrısı, uyuşukluk, titreme, konuşma bozukluğu, bilinç kaybı              |
| <b>Alkilfenol etoksilatlar</b>  | Yün apre işlemleri; deterjan ve ıslatıcı katkı maddeleri                             | Endokrin bozucu etki; özellikle östrojen hormonunu etkileyerek hormon duyarlı dokularda tümör gelişimi  |
| <b>Nonilfenol etoksilatlar</b>  | Yıkama, ağartma ve baskı işlemlerinde ıslatıcı ajan                                  | Üreme bozuklukları, hormonal dengesizlikler, fertilitte azalması ve sperm kalitesinde düşüş   |
| <b>Ağır metaller (Pb, Cd, Cr, As, Hg)</b>                             | Tekstil boyaları ve pigment formülasyonu   | Genotoksik, mutajenik ve kanserojen etkiler; üreme bozuklukları, DNA hasarı, böbrek ve karaciğer hasarı   |
| <b>Azo boyalar (reaktif, remazol, metil nitro vb.)</b>                | Pamuk başta olmak üzere viskon, ipek, yün ve sentetik liflerin boyanması             | Kanserojen, mutajenik ve genotoksik; sucul canlılar için toksik; alerjik cilt hastalıkları ve solunum problemleri   |

Tekstil endüstrisinde, lif üretiminden başlayarak malzemenin farklı işlem ve dönüşüm aşamalarında kaliteyi artırmak amacıyla çok sayıda kimyasal madde kullanılmaktadır. Bu maddeler deri yoluyla emilebilmekte veya soluma yoluyla vücuda girebilmekte, sağlık riskleri oluşturmakta ve alerjik reaksiyonlara ya da cilt tahrişlerine neden olabilmektedir (Machado vd., 2025). Tekstil endüstrilerinde oluşan boya ürünleri ve yan ürünleri, atık su deşarjlarında bulunan kirleticiler ya da üretim sırasında ortaya çıkan tozlar beyin, böbrek, karaciğer ve kalp gibi hayati organları ile solunum, bağışıklık ve üreme sistemlerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Ortaya çıkan hastalıklar; doğrudan maruziyet sonucu, özellikle soluma yoluyla gerçekleşebilen solunum problemleri, astım, alerjik reaksiyonlar, mide bulantısı ile cilt ve göz tahrişi ve dermatit şeklinde görülebilmektedir. Bunun yanı sıra, besin zinciri yoluyla dolaylı maruziyet sonucunda ise tüberküloz, kanser, kanamalar, genetik mutasyonlar ve kalp hastalıkları gibi daha ciddi sağlık sorunları ortaya çıkabilmektedir (Slama vd., 2021).

### 1.3. Doğal boyaların sürdürülebilir tekstilde yeniden yükselişi

Sentetik renklendiriciler, canlı renkler ve verimli boyama çözümleri sunarak birçok endüstrinin dönüşümünde önemli bir rol oynamıştır. Ancak bu maddelerin yaygın kullanımı; mesleki riskler ve çevresel toksisite gibi ciddi dezavantajları da beraberinde getirmiştir. Küresel ölçekte sentetik boyalara olan talep artmaya devam ettikçe, bu sorunlar daha da derinleşmekte ve sürdürülebilir alternatifler ile daha sıkı düzenleyici önlemlere olan ihtiyacı artırmaktadır (Negi, 2025).

Doğal boyaların kullanımı; çevre dostu olmaları, vücutla doğrudan temasa uygun ve güvenli olmaları, basit uygulama özellikleri, doğa ile uyumlu yapıları, yenilenebilir kaynaklardan elde edilmeleri ve formülasyon sırasında kimyasal reaksiyona girme olasılıklarının düşük olması gibi birçok avantaja sahiptir. Doğal boyalar/renklendiriciler, genellikle insan gözü için yumuşak, parlak ve sakinleştirici tonlar sunmaktadır. Çoğu doğal boya sağlık açısından risk oluşturmaz; hatta bazı durumlarda tedavi edici özellikler gösterebilmektedir. Ayrıca, doğal boyaların kullanımı atık bertarafı açısından herhangi bir karmaşıklık yaratmamaktadır. Sürdürülebilir boyama bağlamında doğal boyalar, sentetik boyalara karşı son derece uygulanabilir bir alternatif sunmaktadır. Bunun yanı sıra doğal boyalar; gıdaların renklendirilmesi, kozmetik üretimi, boya-duyarlı güneş pilleri, histolojik örneklerin boyanması, pH tayini ve daha birçok alanda kullanılmaktadır. Son yıllarda, doğal boyaların farklı yönleri akademik çevrelerde giderek artan bir ilgiyle ele alınmış ve bu alandaki araştırmalar hız kazanmıştır (Dey vd., 2025).

Son yıllarda tüketicilerin tekstil malzemelerinin işlevselliği ve güvenliği konusundaki beklentileri artmış; toplumda sürdürülebilir, yeşil ve çevre dostu ürünlere yönelik güçlü bir yönelim gözlemlenmiştir. Bu eğilimle birlikte, sahip oldukları böcek kovucu, koku giderici, alev geciktirici, UV koruyucu, floresan özellikler, antimikrobiyal aktivite, biyouyumluluk, biyobozunurluk ve toksik olmama gibi nitelikler sayesinde doğal boyalara dönüş yeniden önem kazanmıştır. Bu özellikler, ekolojik ve katma değeri yüksek tekstillerin üretilmesinde tekstil endüstrisinde önemli bir dönüşüm yaratmıştır (Danila vd., 2021).

## 2. DOĞAL BOYALARIN SINIFLANDIRILMASI ve TEMEL KAVRAMLAR

Doğal renklendiriciler; kaynakları, çözünürlük özellikleri ve kimyasal yapıları gibi farklı kriterlere göre sınıflandırılabilir.

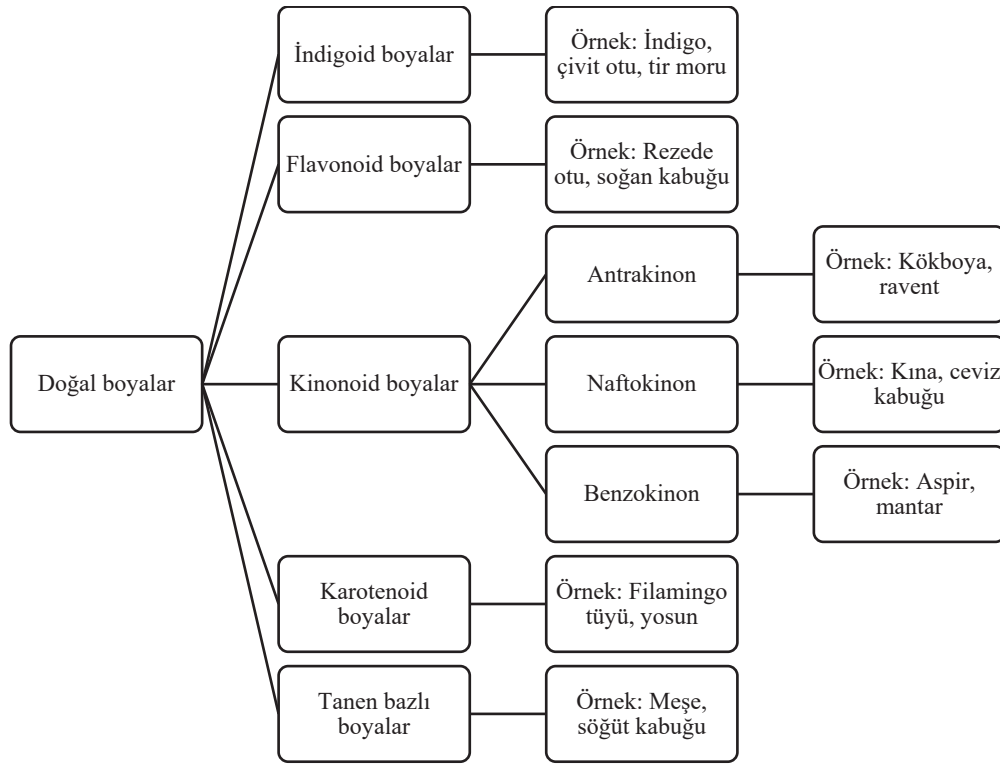
### 2.1. Doğal boyaların kaynaklarına göre sınıflandırılması

Doğal boyalar, bitkilerin kök, kabuk, yaprak, meyve, odun, tohum ve çiçek gibi farklı kısımlarından elde edilmektedir (Danila vd., 2021). Bitkisel kökenli boyalara; *Indigofera tinctoria* bitkisinden elde edilen indigo, *Curcuma longa* L. bitkisinden zerdeçal (kurkumin), *Rubia tinctorum* bitkisinden kökboya örnek verilebilir. Hayvansal boyalar ise böcekler ve yumuşakçalardan elde edilmekte olup, koşinil böceğinden elde edilen karminik asit ve deniz salyangozundan elde edilen Tir (Tyrian) moru bu grubun bilinen örneklerindedir; ancak hayvansal kökenli boyalar etik tartışmalara konu olmaktadır. Mineral bazlı pigmentler, malakit ve ultramarin gibi doğal minerallerden elde edilmekte ve tarihsel olarak sanat ile tekstil boyamacılığında kullanılmıştır. Bununla birlikte, mineral pigmentlerin özütlenmesi yerel ekosistemler üzerinde olumsuz etkilere yol açabilmektedir (Negi, 2025).

### 2.2. Doğal boyar maddelerin kimyasal yapılarına göre sınıflandırılması

Doğal boyar maddeler, sahip oldukları temel kimyasal iskeletler ve fonksiyonel gruplara bağlı olarak indigoid, flavonoid, kinonoid, karotenoid ve tanen bazlı bileşikler başta olmak üzere farklı sınıflar altında incelenmektedir (Şekil 1).

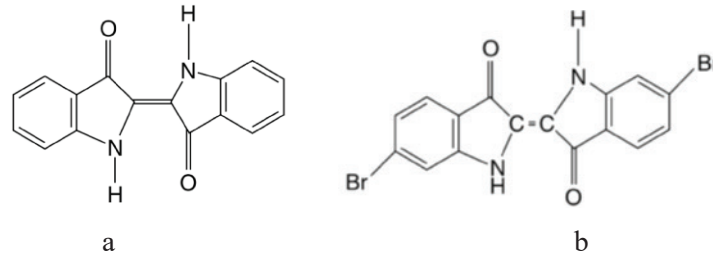




Şekil 1. Doğal boyaların kimyasal yapılarına göre sınıflandırılması (Uddin vd., 2022)

### İndigoid Boyalar

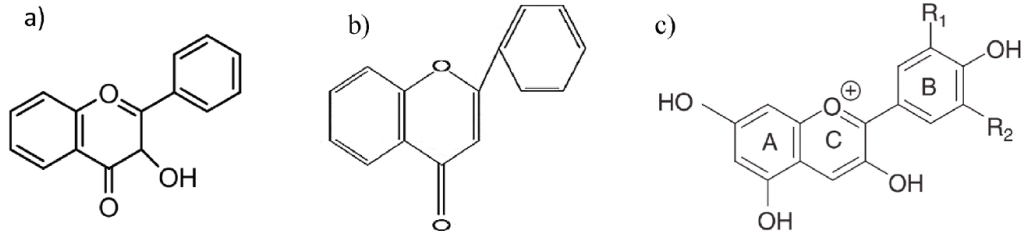
Bu grupta en yaygın kullanılan doğal boya indigo olup, temel bileşeni indigotindir (CI Natural Blue 1). İndigotin, indigo bitkilerinin yapraklarında bulunmakta ve özellikle denim boyamacılığında kullanılan mavi renkli bir organik boyarmaddedir. İndigo boyalarının başlıca kaynakları Indigofera, Isatis ve Polygonum cinslerine ait bitkiler olup, özellikle Indigofera türlerinin yüksek üretim verimi sağladığı bildirilmektedir. Bu gruptaki bir diğer önemli boya olan Tir moru (purpura), Murex türü deniz salyangozlarından elde edilen, indigonun bromlu türevlerinden oluşan bir renklendiricidir; ancak üretimi için çok sayıda deniz canlısına ihtiyaç duyulması nedeniyle kaynakların tükenmesi sonucunda günümüzde kullanımından büyük ölçüde vazgeçilmiştir (Uddin vd., 2022).



Şekil 2. a)İndigo b) Tir moru (tyrian purple) boyalarının kimyasal yapısı (Uddin vd., 2022).

### Flavonoid boyalar

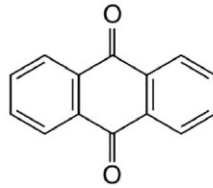
Flavonoidler, bitkilerde yaygın olarak bulunan C6–C3–C6 iskeletine sahip polifenolik yapıda doğal bileşiklerdir. Açık sarıdan kırmızı ve mavi tonlara uzanan geniş bir renk yelpazesine sahiptir. Bitkilerde savunma ve sinyal mekanizmalarında görev almakta ve UV-B ışığını absorbe ederek dokuları radyasyon hasarına karşı korumaktadır. Yaygın flavonoidlerin kimyasal yapıları Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3. a) Flavonolün yapısı (açık sarı), b) Flavonun yapısı ve c) Antosiyaninin yapısı (turuncudan mora kadar) (Uddin vd., 2022)

### Kinonoid Boyalar

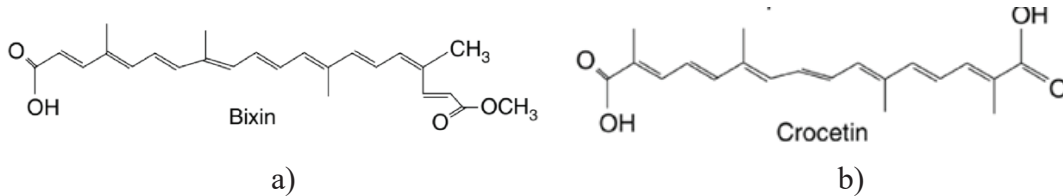
Kinonoid boyalar, doğadaki en çeşitli doğal renklendiriciler arasında yer almakta olup sarıdan kırmızıya uzanan geniş bir renk aralığı sunmaktadır. Kimyasal yapılarına göre antrakinonlar, naftokinonlar ve benzokinonlar olarak sınıflandırılır. Bu boyalarda, kırmızı tonların büyük bölümü antrakinon yapılıdır ve bitkisel ile hayvansal kaynaklardan elde edilmektedir. Avrupa ve Hint kökboyları (*Rubia tinctorum* L. ve *Rubia cordifolia* L.), alizarin ve purpurin içeriğiyle bu grubun en bilinen örnekleri arasında yer alırken; ravent, lak, morinda ve koşinil gibi boyaların da iyi yıkama ve ışık haslığına sahip olduğu bildirilmektedir. Naftokinon boyalar turuncu-kırmızımsı-kahverengi tonlar vermekte olup, kına bitkisindeki lavson ve ceviz türlerindeki juglon bu grubun öne çıkan boyarmaddeleridir. Kına hem geleneksel hem de endüstriyel tekstil boyamacılığında yaygın olarak kullanılmaktadır. Benzokinon boyarmaddelerin düşük lif afiniteleri nedeniyle tekstilde kullanımları sınırlıdır.



Şekil 4. Antrakinon boyanın kimyasal yapısı (Uddin vd., 2022)

### Karotenoid boyalar

Karotenoid boyalar, bitkilerde, alglerde ve bazı mikroorganizmalarda doğal olarak bulunan sarı kırmızı turuncu renkler veren doğal boyarmaddelerdir. Farklı kaynaklardan yüzlerce karotenoid tanımlanmış olup, bunların çoğu karotenler ve ksantofillerden oluşmaktadır. Yaklaşık 40 karbon atomu içeren konjuge bağ sistemine sahip olmaları, ışık soğurma ve reaktivite özelliklerini belirlemektedir. Tekstil boyamacılığında en yaygın karotenoid kaynakları safran (*Crocus sativus* L.) ve annatto (*Bixa orellana* L.) tohumlarıdır (Şekil 5).



Şekil 5. a) Bixinin (annatto), b) Crocetin (safran) kimyasal yapıları (Uddin vd., 2022)

### Tanen bazlı boyalar

Tanenler, molekül ağırlıkları 500–3000 arasında değişen, suda çözünebilir ve polifenolik yapıya sahip bileşiklerdir. Meyve, bakla, bitki mazıları (gal), yaprak, kabuk, odun ve kök gibi bitkisel kaynaklardan elde edilirler. Kimyasal yapılarına göre hidrolize olabilir tanenler, kondense tanenler ve florotanenler olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır. Tekstil boyamacılığında tanenler, doğal bir mordan gibi davranarak boyaların liflere olan afinitesini artırmakta ve sarı, kahverengi, gri ile siyah tonların elde edilmesinde temel bileşenler arasında yer almaktadır (Uddin vd., 2022).

## 2.4. Geleneksel özütleme teknikleri

Doğal boyalar, kaynaklarından; çözücü ile örnek arasındaki temasın ve etkileşimin artırılması yoluyla kütle transfer direncinin azaltılması sayesinde ekstrakte edilebilmektedir. Ancak bu yöntemler; yüksek zaman, enerji ve çözücü tüketimi, düşük özütleme verimi ve ısıya duyarlı bileşiklerin kaybı gibi önemli dezavantajlara sahiptir (Muruganandham vd., 2025).

### 2.4.1. Sulu Özütleme

Sulu özütleme, doğal boyaların elde edilmesinde suyun çözücü olarak kullanıldığı yaygın bir yöntem olup, bitkisel materyallerin su içerisinde ısıtılmasıyla boyar maddelerin ortama geçmesi esasına dayanır. Bitki türü ve hedeflenen renk yoğunluğuna bağlı olarak sıcaklık, pH ve özütleme süresi ayarlanmakta; işlem sonunda katı parçacıklar filtreleme ile uzaklaştırılarak konsantre bir sulu boya çözeltisi elde edilmektedir. Sert kimyasalların kullanımını azaltması ve düşük çevresel etkiye sahip olması nedeniyle, sulu özütleme çevre dostu ve yaygın olarak tercih edilen bir yöntemdir (Pranta ve Rahaman, 2024).

### 2.4.2. Asidik Özütleme

Asidik özütleme, doğal boyaların sitrik veya asetik asit gibi asidik çözeltiler kullanılarak bitkisel materyallerden ayrıştırılmasına dayanan bir yöntemdir. Asidik ortam, hücre duvarlarını ve moleküler bağları parçalayarak boyar maddelerin çözünürlüğünü artırmakta, yüksek sıcaklıklar ise pigment salınımını daha da iyileştirebilmektedir. İşlem sonunda katı kalıntılar filtreleme ile uzaklaştırılarak konsantre bir asidik boya çözeltisi elde edilir. Asidik ortamda daha iyi çözünen doğal boyalar için yaygın olarak kullanılan bu yöntemde, asitlerin güvenli kullanımı ve uygun bertarafı çevresel etkilerin azaltılması açısından kritik önem taşımaktadır (Pranta ve Rahaman, 2024).

### 2.4.3. Alkali Özütleme

Alkali özütleme, doğal boyaların sodyum hidroksit veya sodyum karbonat gibi bazik çözeltiler kullanılarak bitkisel materyallerden elde edilmesine dayanan yaygın bir yöntemdir. Alkali ortam, hücresel yapıları parçalayarak boyar maddelerin çözücüye geçmesini kolaylaştırmakta; gerekirse ısıtma ile pigment çözünürlüğü ve özütleme hızı artırılmaktadır. Filtreleme sonrası kullanıma hazır alkali boya çözeltisi elde edilir. Bazı doğal boyaların alkali ortamda daha kararlı olması nedeniyle tercih edilen bu yöntemde, bazik çözeltilerin güvenli kullanımı ve çevreye zarar vermeyecek şekilde bertarafı önem taşımaktadır (Pranta ve Rahaman, 2024).

### 2.4.4. Çözücü Özütlemesi

Çözücü özütlemesinde, doğal boyalar etanol, metanol veya hekzan gibi organik çözücüler kullanılarak bitkisel materyallerden ayrıştırılmaktadır. Boya molekülleri çözücü içinde çözünerek özütlemesi kolaylaşmakta; çözünürlüğü artırmak amacıyla karıştırma veya ısıtma uygulanabilmektedir. İşlem sonunda çözücünün uzaklaştırılmasıyla konsantre doğal boya çözeltisi elde edilir. Suda çözünürlüğü düşük boyalar için etkili olan bu yöntemde, organik çözücülerin güvenli kullanımı ve uygun bertarafı çevresel açıdan kritik önem taşımaktadır (Pranta ve Rahaman, 2024).

## 2.5. Mordan kavramı ve doğal boyamadaki rolü

Mordanlar, doğal boyama sürecinde boyanın liflere tutunmasını ve dayanıklılığını artıran, boya ile tekstil lifi arasında bağ oluşturarak fikse edici ajan görevi gören maddelerdir. Şap gibi metal tuzları veya tanen gibi organik bileşikler olabilen mordanlar, renk canlılığını ve haslığı iyileştirerek yıkama ve aşınma ile renk kaybını azaltmakta; farklı mordanların kullanımıyla siyah-kahverengi ve yeşil-sarı-turuncu gibi geniş bir renk aralığı elde edilebilmektedir. Potasyum alüminyum sülfat (şap), kalsiyum karbonat ve demir(II) sülfat en yaygın mordanlar arasında yer almaktadır (Lopez-Rodriguez vd., 2024; Dey vd., 2025). Bununla birlikte sürdürülebilir boyama uygulamalarında, geleneksel mordanların çevresel etkilerini azaltmaya yönelik çevre dostu alternatiflere olan ilgi artmakta; bu yaklaşımlar hem boya fiksasyonunu ve haslığı iyileştirmekte hem de ekolojik açıdan sorumlu tekstil üretimine katkı sağlamaktadır (Dey vd., 2025).

Tablo 2. Bitkisel doğal boyamacılıkta kullanılan biyo-mordanlar (Che ve Yang, 2022)

| Biyo-Mordan Kaynağı  | Kimyasal Bileşim  | Uygulanabildiği Lif Türleri        |
|--|---|------------------------------------|
| <i>Memecylon scutellatum</i> , mazi, algler, limon   | Tanik asit (C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> O <sub>4</sub> )                                  | Pamuk, keten, kenevir, jüt         |
| Kestane, mazi, nar, Nil akasyası, kına, zerdeçal, biberiye, mazi meşesi, valonya taneni, mirabolan | Tanenler (polifenolik bileşikler)   | Yün                                |
| Zerdeçal, nar, limon   | Tanenler, kurkuminoidler, organik asitler   | İpek                               |
| Limon, mazi  | Organik asitler, tanenler   | Polyester                          |
| Kına, nar, <i>Pistacia fraxinifolia</i>  | Fenolik bileşikler, lavson, tanenler  | Naylon                             |
| Sitrik asit  | Sitrik asit (C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub> )                                 | Yün, pamuk, naylon, naylon/elastan |
| Tartarik asit, oksalik asit  | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>6</sub> ; H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> | Naylon/elastan                     |
| Krem tartar (potasyum bitartrat)   | Potasyum hidrojen tartarat (C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> KO <sub>6</sub> )                 | Pamuk, viskon, ramie, yün, bambu   |
| Peynir altı suyu proteini (bovin serum albümini, laktalbümin)                                      | Proteinler  | Pamuk                              |
| Sodyum aljinat   | C <sub>6</sub> H <sub>9</sub> NaO <sub>7</sub>  | Pamuk                              |
| Yağsız süt tozu  | Protein, laktoz, yağ, kül   | Rayon                              |
| Sodyum karbonat  | Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>   | Yün, pamuk                         |

## 2.6. Geleneksel Boyama

Boyama, tekstil ürünlerine estetik bir görünüm kazandırmak amacıyla gerçekleştirilen ve doğal renklendiricilerin kumaş liflerine tutunmasını esas alan bir işlemdir (Muruganandham vd., 2025). Geleneksel boyama yöntemlerinde tekstil materyalleri, boyama öncesinde genellikle haşıl sökme, ağartma veya çeşitli kimyasal ön işlemlerden geçirilmektedir. Doğal boya özütlemesinin ardından, tekstil materyali ön mordanlama, eş zamanlı mordanlama ya da son mordanlama yöntemlerinden biri uygulanarak mordanlanmaktadır. Daha sonra boyar madde, belirli sıcaklık ve süre koşullarında boya banyosu içerisinde kumaşa aktarılmaktadır. Asidik, alkali veya nötr ortamlarda gerçekleştirilen bu boyama işlemleri, boyar maddenin lifle etkileşimini ve genel boyama performansını önemli ölçüde etkilemektedir (Dey vd., 2025).

## 3. GELENEKSEL DOĞAL BOYAMA YÖNTEMİNİN SINIRLILIKLARI VE YENİLİKÇİ YÖNTEMLERİN GEREKÇELERİ

### 3.1. Yüksek Hacimli Üretim ve Düşük Verim

Doğal boyar maddelerin bitkisel ve biyolojik kaynaklardan elde edilmesi, çoğu zaman düşük özütleme verimi ve uzun işlem süreleriyle sınırlı kalmakta; geleneksel yöntemler yüksek hacimli üretim gereksinimlerini karşılamada yetersiz olmaktadır. Bu nedenle ultrasonik, mikrodalga ve enzim destekli özütleme gibi yenilikçi ve biyoteknolojik yaklaşımlar, doğal boyar maddelerin üretim hızını ve miktarını artırma potansiyeli sunmaktadır (Uddin vd., 2022).

### 3.2. Standardizasyon ve Tekrarlanabilirlik Sorunu

Doğal boyar madde kaynaklarının ticari ölçekte standartlaştırılmış tarımsal üretim sistemlerine dâhil edilmemesi, kalite ve renk tutarlılığında önemli dalgalanmalara yol açmaktadır. Hasat zamanı, iklim koşulları ve toprak yapısı gibi çevresel etkenler, doğal ekstraktların kimyasal bileşimini etkileyerek partiler arası renk farklılıklarına neden olmakta ve bu durum endüstriyel üretim için ciddi bir engel oluşturmaktadır. Literatürde, söz konusu sorunun ancak kamu otoriteleri, tarım sektörü ve tekstil

sanayisinin iş birliğiyle geliştirilecek standart üretim ve boyama protokolleri aracılığıyla aşılabileceği vurgulanmaktadır (Uddin vd., 2022; Che ve Yang, 2022; Islam vd., 2025; Dey vd., 2025).

### 3.3.Mordanlama Gereksinimi ve Çevresel Etkiler

Doğal boyar maddelerin çoğu liflere doğrudan bağlanmadığından mordan kullanımı gerekli olmakta; ancak geleneksel metal bazlı mordanlar toksik atık sulara yol açarak çevresel sürdürülebilirliği olumsuz etkilemektedir. Bu durum, doğal boyaların çevre dostu niteliğini zayıflatmakta olup, güncel çalışmalar biyomordanlar ve doğal kökenli alternatif mordanlama sistemlerinin geliştirilmesinin artık zorunlu olduğunu ortaya koymaktadır (Uddin vd., 2022; Islam vd., 2025).

### 3.4.Renk Haslığı ve Dayanıklılık

Doğal boyalarla yüksek yıkama ve ışık haslığına ulaşmak, mordan kullanılsa dahi her zaman mümkün olmamakta; özellikle pamuk gibi selülozik liflerde yıkama haslığı düşük kalırken, yün gibi protein esaslı liflerde daha iyi sonuçlar elde edilmektedir (Uddin vd., 2022). Bu durum, lif–boya etkileşimini güçlendirecek ileri yüzey modifikasyon ve kaplama teknolojilerine olan ihtiyacı artırmaktadır.

### 3.5.Fiyat, Verimlilik ve Su Tüketimi

Düşük boya verimi ve sınırlı tedarik zinciri nedeniyle doğal boyar maddeler, sentetik boyalara kıyasla daha yüksek maliyetlidir; buna ek olarak klasik banyo boyama teknikleri yüksek su ve enerji tüketimi gerektirmektedir. Literatürde, doğal boyaların yaygınlaşmasının ancak su ve enerji kullanımını azaltan yenilikçi proseslerin geliştirilmesiyle mümkün olabileceği vurgulanmaktadır (Che ve Yang, 2022; Hossain vd., 2023; Islam vd., 2025).

### 3.6. Yeni Fonksiyonel Beklentiler

Günümüzde tekstil endüstrisi, yalnızca renklendirme işlevi sunan boyama sistemlerinden ziyade; UV koruma, antimikrobiyal etki, termokromik davranış ve akıllı tekstil özellikleri sağlayan fonksiyonel ürünlere yönelmektedir. Ancak geleneksel doğal boyama yöntemleri, bu çok işlevli performans beklentilerini karşılamakta yetersiz kalmaktadır. Doğal boyaların fonksiyonel özellik kazandırabilmesi için ileri özütleme teknikleri, yüzey modifikasyonları ve biyopolimer kaplama sistemleriyle entegre edilmesi gerekmektedir. Literatürde, ultrason ve mikrodalga destekli özütleme yöntemlerinin yalnızca boya verimini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda UV koruma ve antibakteriyel performansı da iyileştirdiği bildirilmektedir. Buna ek olarak, plazma ön işlemleri ve sol-jel kaplama teknikleri, doğal boyaların lif yüzeyine daha güçlü bağlanmasını sağlayarak hem renk haslığını hem de fonksiyonel dayanıklılığı artırma potansiyeli sunmaktadır (Yuan vd., 2023). Bu nedenle doğal boyaların teknik tekstiller ve yüksek katma değerli fonksiyonel tekstil ürünleriyle rekabet edebilmesi, geleneksel boyama yaklaşımlarının ötesine geçilmesini ve disiplinler arası yenilikçi çözümlerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

## 4. DOĞAL BOYAMADA TEKNOLOJİ TABANLI DÖNÜŞÜM

### 4.1. İleri özütleme teknolojilerinin entegrasyonu

Geleneksel özütleme yöntemlerinin sınırlılıklarını azaltmak amacıyla termal olmayan ve konvansiyonel olmayan teknolojilere yönelik araştırmalar giderek artmaktadır (Muruganandham vd., 2025). Sürdürülebilir boya özütleme tekniklerinin benimsenmesi; tekstil endüstrisinin çevresel ayak izinin azaltılmasına, biyolojik çeşitliliğin ve yerel toplulukların korunmasına katkı sağlamaktadır. Bu kapsamda susuz boyama, biyoteknolojik yaklaşımlar, atık kaynaklı ve bitkisel boyalar gibi stratejiler, doğal kaynak tüketimini ve çevresel etkileri azaltmaktadır (Pranta ve Rahaman, 2024). Her ne kadar modern doğal boya özütleme yöntemleri yüksek verimlilik sunsa da, yüksek maliyetler ve ekipman gereksinimleri küçük ölçekli üreticiler için önemli bir engel oluşturmaktadır. Ancak teknolojik gelişmeler, kamu destekleri ve artan çevre dostu ürün talebi, özellikle ultrason destekli ve mikrobiyal özütleme yöntemlerini zamanla daha erişilebilir hâle getirecektir.

Tablo 3. Geleneksel ve ileri doğal boya özütleme yöntemlerinin karşılaştırılması (Yadav vd., 2025).

| Parametreler              | Geleneksel Yöntemler                          | Modern / İleri Yöntemler  |
|---------------------------|---|---|
| Özütleme Verimi           | Düşük – Orta (%25–40)                         | Yüksek – Çok Yüksek (%60–98)  |
| Özütleme Süresi           | Uzun (2–6 saat)                               | Kısa (10–60 dakika)   |
| Çözücü / Enerji Kullanımı | Yüksek  | Düşük – Karşılaştırılabilir   |
| Renk Haslığı              | Orta (3,0–3,5)                                | Yüksek (4,5–5,0)  |
| Çevresel Etki             | Yüksek (daha fazla su ve enerji tüketimi)     | Düşük (düşük emisyon, yeşil çözücüler, az atık)                       |
| Ekipman Maliyeti          | Düşük (kaynatma kapları gibi basit sistemler) | Yüksek (ileri reaktörler, mikrodalga sistemleri, süperkritik kaplar)  |
| Ölçeklenebilirlik         | Orta (emek yoğun, kesikli/batch prosesler)    | Yüksek (otomasyona uygun, verimli, sürekli akış sistemleriyle uyumlu) |
| Sürdürülebilirlik         | Sınırlı (yüksek kaynak ihtiyacı nedeniyle)    | Güçlü (çevre dostu girdiler, dögüsel ekonomiyi destekler)             |

Yaşam döngüsü ve tekno-ekonomik analizler, Basınçlı Sıvı Özütlemesi ve Mikrodalga Destekli Özütlemesinin geleneksel kaynatmaya kıyasla enerji tüketimini %60'a, çözücü kullanımını ise %40–70 oranında azalttığını ve yüksek boya verimini koruduğunu göstermektedir. Süperkritik Akışkan Özütlemesi, yüksek enerji gereksinimine rağmen geri dönüştürülebilir CO<sub>2</sub> kullanımı sayesinde katı atığı %80, arıtma ihtiyacını %50 azaltmaktadır; buna karşılık geleneksel yöntemler kg başına 10–15 L su tüketmekte ve yalnızca %30–40 geri kazanım sağlamaktadır. Bu bulgular, yüksek başlangıç maliyetlerine rağmen modern yöntemlerin uzun vadede sürdürülebilirlik ve proses verimliliği açısından üstün olduğunu ortaya koymaktadır (Yadav vd., 2025).

#### 4.1.1. Ultrason destekli özütleme

Ultrasonik özütleme, doğal boyaların su veya etanol gibi çözücüler içinde yüksek frekanslı ses dalgalarıyla, kavitasyon etkisi sayesinde hücre duvarlarının parçalanması yoluyla elde edilmesini sağlar. Kontrollü sıcaklıklarda gerçekleştirilen bu yöntem, geleneksel tekniklere kıyasla daha kısa işlem süresi, daha düşük enerji ve kimyasal tüketimi sunarken özütleme verimini artırmakta ve ısıya duyarlı bileşikleri korumaktadır. Bu nedenlerle ultrason destekli özütleme, tekstil başta olmak üzere gıda ve kozmetik endüstrilerinde doğal boya üretimini daha verimli ve çevre dostu hâle getiren yaygın bir yöntem olarak kullanılmaktadır (Pranta ve Rahaman, 2024; Yadav vd., 2025).

#### 4.1.2. Mikrodalga destekli özütleme

Mikrodalga destekli özütleme, doğal boyaların su veya etanol gibi mikrodalgaya uygun çözücüler kullanılarak mikrodalga radyasyonu ile hızlı ve verimli biçimde elde edildiği modern bir yöntemdir. Mikrodalga enerjisinin moleküler titreşimi artırması sayesinde kısa sürede yüksek özütleme verimi sağlanmakta; kontrollü sıcaklık ve süreler, pigment bozulmasını önlemektedir. Az çözücü kullanımı, kısa işlem süresi ve yüksek verim sunması nedeniyle çevre dostu bir alternatif olarak öne çıkan bu yöntemin etkinliği; çözücü türü, materyal özellikleri, hedef bileşik yapısı, sıcaklık, süre ve mikrodalga gücüne bağlıdır (Pranta ve Rahaman, 2024). Mikrodalga özütlemesi açık ve kapalı kap sistemlerinde uygulanabilmekte; kapalı sistemler düşük çözücü tüketimi ve uçucu kayıplarının azaltılması avantajı sunarken, açık sistemler atmosferik basınçta güvenli çalışma ve reaktif ilavesine olanak sağlamaktadır (Yadav vd., 2025). Berberis ve meşe palamudu ile organik pamuğun mikrodalga destekli boyanması, geleneksel yöntemlere kıyasla daha üstün kolorimetrik özellikler, maliyet etkinliği ve zaman tasarrufu sağladığını göstermiştir (Büyükakıncı vd., 2021). Benzer şekilde, koşinil kaynaklı doğal boyanın mikrodalga destekli özütleme ile elde edilerek ipek kumaşların

boyanmasında kullanılması, renk verimini ve boyama performansını belirgin biçimde artırmıştır (Amin vd., 2020).

#### 4.1.3. Öğütme destekli mikrodalga özütleme

Öğütme destekli mikrodalga özütleme, mekanik öğütme ile eş zamanlı mikrodalga ışınlamasını birleştiren, başlangıçta bileşik sentezi için geliştirilmiş yenilikçi bir tekniktir ve doğal boya özütlemesine uyarlanması nispeten yenidir. Bu yöntemde bitkisel materyal, çözücü varlığında ya da çözücü kullanılmadan, mikrodalga fırına entegre cam tüp havan–tokmak sistemi içinde öğütülmekte; mekanik parçalama hücre yapısını zayıflatırken mikrodalga ışınlaması hızlı ısınma sağlayarak boya bileşenlerinin ortama etkin biçimde geçmesini teşvik etmektedir. Deneysel çalışmalar, bu tekniğin geleneksel mikrodalga destekli özütlemeye kıyasla özütleme verimini %10–15 artırdığını, çözücü kullanımını azalttığını ve pigment bütünlüğünü daha iyi koruduğunu göstermekte; bu yönleriyle yöntemin bitkisel kökenli boyalar için çevre dostu ve maliyet etkin bir alternatif sunduğu belirtmektedir (Yadav vd., 2025).

#### 4.1.4. Fermantasyon

Fermantasyon, mikroorganizmaların organik materyalleri boyar bileşiklere dönüştürdüğü, sıcaklık, pH ve oksijen koşullarının kontrollü olduğu biyoteknolojik bir yöntemdir. Fermentasyon sonrası pigmentler filtrelenerek konsantre doğal boya çözeltileri elde edilmekte; yenilenebilir kaynak kullanımı, düşük kimyasal ihtiyacı ve biyoaktif özelliklerin korunması sayesinde süreç yeşil kimya ilkeleriyle uyumlu, sürdürülebilir bir alternatif sunmaktadır (Pranta ve Rahaman, 2024). Kateşu, kökboya, dut yaprağı ve nar kabuğu yüksek renk verimi, iyi haslık ve UV koruma özellikleriyle öne çıkarken; ayrıca bal kabağı çekirdeği yağının sulu enzimatik özütleme ile elde edilmesi ve enzimatik olarak çıkarılan doğal boyaların poliamid kumaşların endüstriyel boyanmasında uygulanabilir olduğu raporlanmıştır (Dey vd., 2025).

#### 4.1.5. Enzimatik özütleme

Enzimatik özütleme, bitki hücre duvarlarını parçalayan selüloz, pektinaz ve lakkaz gibi özgül enzimler aracılığıyla boyar maddelerin daha etkin serbest bırakılmasını sağlayan çevre dostu bir yöntemdir. Özellikle meyveler, soğan kabukları ve çiçek taç yapraklarından elde edilen flavonoidlerin özütleme veriminin %20–30 oranında arttığı; aynı zamanda renk stabilitesinin iyileştiği ve işlem süresinin kısaldığı raporlanmıştır. Düşük enerji gereksinimi, toksik olmayan ve biyobozunur yapısı sayesinde geleneksel çözücü bazlı yöntemlere kıyasla daha yeşil bir alternatif sunmaktadır (Pranta ve Rahaman, 2024; Yadav vd., 2025). Enzimatik işlemler pigment yapısında dönüşümlere de yol açabilmekte; örneğin gardenya pigmenti genipozidin kırmızı ve mavi türevlerine dönüştürülmesi bu duruma örnek teşkil etmektedir. Ayrıca papain enzimi ön işleminin polyester/pamuk karışım kumaşlarda hidrofobik yapıyı azaltarak daha basit, çevre dostu ve sürdürülebilir bir boyama sürecini mümkün kıldığı bildirilmektedir (Dey vd., 2025; Molla vd., 2025).

#### 4.1.6. Süperkritik akışkan özütleme

Süperkritik özütleme, boyar maddelerin süperkritik akışkanlar (özellikle karbondioksit CO<sub>2</sub>, propan, bütan veya etilen) içindeki yüksek çözünürlüğünden yararlanan ileri bir tekniktir. Özütleme, boya bileşenlerinin 40–80 °C sıcaklık ve 35–75 MPa basınç aralıklarında süperkritik CO<sub>2</sub> ile etkileştiği yüksek basınçlı kaplarda gerçekleştirilmektedir. Sıcaklık ve basınçtaki küçük değişimler, çözücü gücünü önemli ölçüde etkileyerek seçici ve yüksek verimli özütlemeye olanak tanımaktadır. Süperkritik CO<sub>2</sub>'nin gaz ve sıvı özelliklerini birlikte göstermesi, özütleme sonrası basınç düşürüldüğünde kolayca uzaklaştırılmasını ve geride konsantre doğal boyanın kalmasını sağlamaktadır. Düşük toksisite, çözücü geri kazanımı, az çözücü kullanımı ve ısıya duyarlı boyaların korunması, bu yöntemin başlıca avantajları arasında yer almaktadır (Pranta ve Rahaman, 2024; Yadav vd., 2025).

#### 4.1.7. Basınçlı sıvı özütleme

Basınçlı sıvı özütlemesi, boyar madde geri kazanımını artırmak amacıyla yüksek sıcaklık ve orta–yüksek basınç altında gerçekleştirilen, zaman açısından verimli ve düşük çözücü tüketimine sahip bir tekniktir. Proses; numunenin inert materyallerle dağıtılarak özel özütleme kabına yerleştirilmesi, ardından 0,5–21 dakika süren statik fazda çözücüyle temas ettirilmesi ve bunu izleyen dinamik fazda çözücünün sürekli akış hâlinde geçirilmesi esasına dayanır. Yöntemin etkinliği çözücü türü, sıcaklık, basınç ve adsorban özelliklerine bağlı olup, hızlı özütleme ve düşük çözücü kullanımı başlıca avantajlarıdır; buna karşın yüksek ekipman maliyeti ve özütleme sonrası ek saflaştırma gereksinimi önemli dezavantajlar arasında yer almaktadır (Yadav vd., 2025).

#### 4.1.8. Katı faz özütleme

Katı faz özütleme, hedef boyar maddelerin özelliklerine göre seçilen silika, karbon veya kil bazlı adsorbanlar kullanılarak gerçekleştirilen ve sıvı–sıvı özütlemesine benzer biçimde fazlar arası dağılıma dayanan bir tekniktir. Katı adsorbanlar, boyar bileşenlerin deriştirilmesini ve saflaştırılmasını sağlayarak özütleme verimliliğini artırmakta; sıvı–sıvı özütlemesine kıyasla daha yüksek geri kazanım, daha az emülsiyon oluşumu ve daha basit operasyonel süreçler sunmaktadır (Yadav vd., 2025).

#### 4.1.9. Yüzey aktif madde aracılı teknikler

Yüzey aktif madde aracılı özütleme, iyonik olmayan yüzey aktif maddeler kullanılarak sulu çözeltilerden hidrofobik bileşenlerin yüzey aktif maddece zengin faza transfer edilmesi esasına dayanmaktadır. Özütleme verimi, ultrason veya mikrodalga ışınımı ile desteklendiğinde daha da artmakta; bu yöntem özellikle suda düşük çözünürlüğe sahip boyar maddelerin etkin geri kazanımında yüksek performans sunmaktadır (Yadav vd., 2025).

## 4.2. Alternatif Mordanlama Yaklaşımları

Doğal boyaların tekstil liflerine sınırlı bağlanma kabiliyeti, renk verimi ve şiddetini artırmak için metal bazlı mordanlar ve güçlü kimyasal reaktiflerin kullanımını gerektirmekte; bu durum doğal boyaların çevre dostu niteliğiyle çelişmektedir (Mehrparvar vd., 2016). Son dönemde, doğal boyaların çevre dostu yapıları nedeniyle kullanım alanları genişlerken, boyanabilirliklerinin artırılması önemli bir araştırma konusu olmuştur. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda, m-transglutaminaz (m-TGase) ve bentonit nanokilden oluşan biyo-nano-mordanların yün kumaşların doğal boyalarla boyanmasındaki etkileri incelenmiştir. Sonokimyasal yöntemle farklı konsantrasyonlarda uygulanan bu sistemin, yün lifleriyle güçlü etkileşimler oluşturduğu ve yüzey yapısını belirgin biçimde değiştirdiği rapor edilmektedir. Kökboya ile yapılan boyamalarda, işlem görmüş yün kumaşların renk kuvveti (K/S) ve yıkama haslığı değerlerinin işlem görmemiş numunelere göre daha yüksek olduğu, özellikle %5 oranındaki biyo-nano-mordanın en iyi sonuçları verdiği belirtilmektedir (Pour vd., 2020).

SiO<sub>2</sub> ve TiO<sub>2</sub> nanoparçacıkları sol-jel yöntemiyle sentezlenerek kökboya (madder) ile pamuk kumaşın boyanmasında uygulanmıştır. Nanoparçacık ilavesi, renk şiddetini (K/S), haslık özelliklerini ve ultraviyole koruma faktörünü (UPF) artırılmış pamuklu kumaşa kıyasla belirgin biçimde artırmıştır. Karşılaştırmalı sonuçlar, TiO<sub>2</sub> nanoparçacıklarının SiO<sub>2</sub>'ye göre daha yüksek renk verimi, daha iyi haslık ve üstün UV koruma sağladığını ortaya koymaktadır (Gupta vd., 2022).

Sentezlenen ZnO nanoparçacıklarının mordan olarak kullanımıyla ipek kumaşların çay polifenollerini ve hematoksinin gibi farklı doğal boyar maddelerle boyanması incelenmiştir. Bulgular, ZnO nanoparçacıklarının yüksek yüzey alanı sayesinde mordanlama etkinliğini artırdığını ve özellikle yıkama ile ışık haslığının geleneksel metal mordanlara kıyasla belirgin biçimde iyileştiğini ortaya koymaktadır. Bu yönüyle ZnO nanoparçacıkları, doğal boyama süreçlerinde fonksiyonel ve çevre dostu bir mordan alternatifi olarak değerlendirilmektedir (Du vd., 2022).

Literatürde, zirkonyum dioksit (ZrO<sub>2</sub>) nanoparçacıklarının doğal boyalarla yün kumaşların boyanmasında mordan olarak kullanımına yönelik çalışmalar öne çıkmaktadır. Bu kapsamda, farklı oranlarda uygulanan nano-ZrO<sub>2</sub>'nin, kekik (Thymus) ile gerçekleştirilen mordanlama öncesi,



eşzamanlı ve mordanlama sonrası boyama süreçlerinde kumaş performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Nano-ZrO<sub>2</sub> ile mordanlanan yün kumaşların alevlenebilirliğinin azaldığı, bu durumun lif yapısına entegre olan nanoparçacıkların ısı yalıtıcı etkisinden kaynaklandığını ortaya konmuştur. Ayrıca, Nano-ZrO<sub>2</sub> varlığı kumaşların hidrofobik karakterini artırmış; hem Gram-pozitif hem de Gram-negatif bakterilere karşı belirgin antibakteriyel özellikler kazandırmıştır (Taheri vd., 2015).

### 4.3. Yenilikçi doğal boyama çalışmaları

Nanoteknolojinin potansiyeli, tekstil endüstrisinde mevcut fonksiyonellikleri iyileştirmek ve tekstillere tamamen yeni özellikler kazandırmak amacıyla araştırılmaktadır. Lif, iplik ve kumaşın üretiminde ve kimyasal işlemlerinde nanoteknolojinin kullanımı, geleneksel tekstillere kıyasla üstün fonksiyonel özellikler sunarak tekstil uygulamalarının kapsamını genişletmiştir. Nanoteknoloji ile geliştirilebilen tekstil özellikleri arasında yumuşaklık, dayanıklılık, nefes alabilirlik, su iticilik, alev geciktiricilik ve UV koruma yer almaktadır. Fonksiyonel özelliklerin yanı sıra, nanoteknoloji nanoparçacıklar formunda tekstillerin renklendirilmesinde daha yüksek verim sağlamak amacıyla da kullanılabilir. Bu yaklaşımın başarılı olabilmesi için, nanoparçacıkların yeterince küçük boyutlara indirgenmesi ve boya banyosunda agregasyonu önleyecek şekilde iyi dağılması gerekmektedir (Gupta vd., 2022).

Doğal boyaların tekstil uygulamalarındaki temel sınırlılığı, düşük stabilite ve zayıf lif–boya etkileşimidir. Bu sorunun aşılmasında, kil esaslı taşıyıcılarla geliştirilen hibrit pigment sistemleri etkili bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Özellikle klorofilin halloysit nanotüpleri ile hibritleştirilmesi, pigmentin yüksek oranda adsorbe edilmesini ve çevresel etkilere karşı stabilize edilmesini sağlamaktadır. Literatürde bildirilen yüksek adsorpsiyon verimleri, halloysitin doğal pigmentler için etkin bir taşıyıcı olduğunu göstermekte; bu stabilizasyon etkisi, boyama ve baskı sonrası tekstil yüzeylerinde iyileştirilmiş haslık performanslarıyla ilişkilendirilmektedir. Ön işlem uygulanmış ve uygulanmamış kumaşların karşılaştırılması, hibrit pigment–lif etkileşiminin süreç koşullarına bağlı olarak optimize edilebildiğini ve endüstriyel kabul edilebilir haslık seviyelerine ulaşılabildiğini ortaya koymaktadır (Lopez-Rodriguez vd., 2024).

Kitosan–polipropilen imin dendrimer temelli lif ön işlemleri, metal mordan kullanımını azaltan veya ortadan kaldıran sürdürülebilir bir alternatif sunarak hem çevresel etkiyi düşürmekte hem de doğal boyaların renk performansını iyileştirmektedir. Bu yaklaşım, ekolojik tekstil üretimi ve yeşil kimya prensipleriyle güçlü bir uyum göstermektedir (Mehrparvar vd., 2016).

Atmosferik hava plazması, kimyasal kullanımına gerek duyulmadan tekstil yüzeylerinin modifiye edilmesini sağlayan fiziksel bir aktivasyon yöntemidir. Plazma uygulamasıyla lif yüzeyinde oluşan aşındırma etkisi ve aktif fonksiyonel gruplar, yüzey enerjisini artırarak boyar maddelerle etkileşimi güçlendirmekte; bu özellik özellikle protein liflerinde boyar madde alımını ve bağlanmasını iyileştirmektedir. Doğal bitkisel boyalarla yapılan boyamalarda, plazma ile aktive edilmiş lif yüzeyleri boyar maddelerin lif içine difüzyonunu ve lif–boya bağlarının stabilitesini artırmakta; mikrodalga destekli boyama gibi enerji verimli yöntemlerle birlikte kullanıldığında daha kısa sürede homojen renklenme ve iyileştirilmiş haslık özellikleri sağlamaktadır (Eyupoglu vd., 2025).

Yün liflerinin doğal kökboya ile renklendirilmesinde, lif–boya etkileşimini güçlendiren çevre dostu ön işlemler önemli bir rol oynamaktadır. Bu kapsamda doğal kökenli bir yüzey aktif madde olan soya lesitinin kimyasal ve fiziksel olarak modifiye edilerek kullanılması, lif yüzeyinde boyar madde penetrasyonunu ve homojen difüzyonu artıran etkili bir yaklaşım sunmaktadır. Düşük sıcaklık plazma uygulamaları ise kimyasal reaktif kullanmadan lif yüzeyinde mikro pürüzlülük ve aktif fonksiyonel gruplar oluşturarak yünün boyar maddelere olan afinitesini artırmaktadır. Plazma ile aktive edilmiş liflerin biyobazlı yardımcı maddelerle birlikte kullanılması, doğal boyamanın daha düşük sıcaklıklarda ve enerji tasarrufu sağlayan koşullarda gerçekleştirilmesine olanak tanımakta; asetillenmiş lesitin varlığında plazma işlemleri yün liflerinin yaklaşık 76,5 °C’de etkili biçimde boyanabildiği bildirilmektedir. Bu kombine yaklaşımlar, metal mordan kullanımını azaltırken doğal boyaların yün lifleri üzerindeki performansını iyileştiren sürdürülebilir bir strateji sunmaktadır.

(Barani ve Maleki, 2011). Çevre dostu yöntemlerle renkli ve antibakteriyel tekstiller elde etmek amacıyla pamuk ve bambu rayon örme kumaşlar düşük basınçlı, radyo frekanslı su buharı plazması ile işlem görmüş ve Japon düğümütu (*Fallopia japonica*) rizom ekstraktı ile boyanmıştır. Sonuçlar, plazma işleminin selülozik lif yüzeyinde hafif bir aşındırma etkisi oluşturarak boya alımını artırdığını göstermiştir. Plazma işlemlen numunelerde *S. aureus*'a karşı antibakteriyel etki gözlenirken, *E. coli*'ye karşı anlamlı bir etki belirlenmemiştir (Gorjanc vd., 2016).

Literatürde, yün liflerinin kına yaprakları ve civanperçemi çiçekleri gibi doğal boyalarla renklendirilmesinin optimizasyonunda Yanıt Yüzey Metodolojisi'nin (RSM) etkin biçimde kullanıldığı bildirilmektedir. Doğal boyaların liflere olan düşük afinitesi nedeniyle metal mordan kullanımının yaygın olduğu, ancak bu gereksinimi azaltmak amacıyla çevre dostu ön işlem yöntemleri arasında plazma uygulamalarının öne çıktığı vurgulanmaktadır. Çalışmalarda, plazma gücü, boyama sıcaklığı ve şap mordan konsantrasyonundaki artışın renk değerini yükselttiği; daha düşük pH koşullarında ise daha yüksek renk şiddeti sağlandığı raporlanmıştır. Bu yöntemin yün liflerinin boyanabilirliğini artıran ve potansiyel olarak toksik metal mordan ihtiyacını azaltan etkili bir yüzey modifikasyon tekniği olduğu ifade edilmektedir (Haji, 2020).

Pamuk liflerinin dikloro-s-triazinil reaktif grubu içeren anyonik köprüleyici ajanlarla ön işlemde geçirilmesi, berberin gibi alkaloid yapılu doğal boyalarla yapılan boyamalarda yıkama ve kuru temizleme haslığını belirgin biçimde iyileştirmektedir. Bu reaktif köprüleyici sistemler, lif-boya etkileşimini kimyasal bağlanma yoluyla güçlendirmektedir. Bunun yanı sıra, ultrasonik boyama gibi fiziksel enerji destekli yöntemlerin *Symplocos spicata* ile pamuk boyamada boya alımı ve haslık özelliklerini geleneksel yöntemlere kıyasla artırdığı; gama ışını ile lif ve boya ön işlemlerinin ise yapısal değişimler yoluyla renk haslığını geliştirdiği rapor edilmektedir. Enzimatik ön işlemler de özellikle protein esaslı liflerde etkili olup, ipek liflerinin lipaz, diastaz ve proteaz-amilaz gibi enzimlerle ön işlemde geçirilmesi, lif yüzeyinin kontrollü biçimde modifiye edilmesini sağlayarak boyar madde bağlanmasını ve haslık performansını iyileştirmekte; bu biyoteknolojik yaklaşımlar kimyasal mordan kullanımını azaltma potansiyeliyle sürdürülebilir tekstil uygulamalarıyla uyum göstermektedir (Yuan vd., 2023).

Çalışmalarda, doğal kına boyası ile polyester kumaşların boyanmasında mikrodalga destekli, çevre dostu bir yöntem öne çıkmaktadır. Limonun biyomordan olarak kullanıldığı bu yaklaşım, geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında boya alımını belirgin biçimde artırmakta ve boyama süresini yaklaşık %60–65 oranında azaltmaktadır (Arain vd., 2021).

#### 4.4. Doğal Boyama ile Fonksiyonel Özellik Kazandırma

Doğal boyaların kullanımı, sentetik boyarmaddelerin olumsuz etkilerini azaltmanın ötesinde, tekstil kumaşlarına ek biyolojik ve fonksiyonel özellikler kazandırmaktadır. Geniş ölçüde erişilebilir, toksik olmayan, alerjik reaksiyonlara yol açmayan ve antioksidan özellikler sergileyen doğal boyalar, çevre dostu bir alternatif sunmaktadır. Doğal boyalarda bulunan indigoid, piridin, karotenoid, kinonoid, flavonoidler, betalainler, antosiyaninler, antrakınonlar ve tanenler; tekstil liflerindeki –OH, –SO<sub>3</sub>H, –COOH, –C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>OH ve –NH<sub>2</sub> gibi fonksiyonel gruplarla etkileşerek alev geciktirici, böcek kovucu, antibakteriyel ve UV koruyucu özelliklerin oluşumunda rol oynamaktadır. Bu fonksiyonel özelliklerden sorumlu başlıca doğal boyar bileşenler Tablo 4'te özetlenmiştir (Eyüpoğlu vd., 2025; Uddin vd., 2022).

Tablo 4. Fonksiyonel özelliklere göre doğal boyalar ve sorumlu kimyasal bileşenleri (Uddin vd., 2022)

| Fonksiyonel Özellik                    | Doğal Boya (Botanik Adı)   | Fonksiyonel Özelliğten Sorumlu Bileşen      | Test Edilen Substrat |
|--|--|---|----------------------|
| Antimikrobiyal                         | Nar kabuğu ( <i>Punica granatum</i> )  | Hidrolize tanenler (pirogalol)              | Lyocell              |
| Sivrisinek kovucu                      | Nar kabuğu ( <i>Punica granatum</i> ) + PVA  | Ellagik tanen, polivinil alkol              | Pamuk                |
| Antimikrobiyal, güve önleyici          | Kına ( <i>Lawsonia inermis</i> )   | Lawsone (2-hidroksi-1,4-naftokinon)         | Yün                  |
| Antibakteriyel, antioksidan            | Kitosanla işlem görmüş kına ( <i>Lawsonia inermis</i> )                                    | Polikasyonik yapıdaki kitosan + lawsone     | Jüt                  |
| Antimikrobiyal                         | Kitosanla işlem görmüş çay ( <i>Camellia sinensis</i> )                                    | Polifenoller, kitosan                       | Yün                  |
| Antibakteriyel                         | Bakayan ( <i>Melia composita</i> )   | Alkaloidler ve limonoidler                  | İpek, yün, pamuk     |
| Antibakteriyel, UV koruma              | Kökboya ( <i>Rubia tinctorum</i> ), Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> )                  | Di- ve tri-hidroksiantrakinonlar, karthamin | Poliamid 6           |
| Antibakteriyel                         | Neem ( <i>Melia azedarach</i> )  | Fenolik bileşikler ve flavonoidler          | Kenevir              |
| Antimikrobiyal                         | Golden dock ( <i>Rumex maritimus</i> )   | Tanen                                       | Yün                  |
| Antibakteriyel                         | Berberis ( <i>Berberis vulgaris</i> )  | Berberin (kuaterner amonyum yapısı)         | Yün                  |
| Antibakteriyel                         | Şakayık ( <i>Paeonia officinalis</i> )   | Paenol, paeoniflorin türevleri              | Pamuk, yün, ipek     |
| Antimikrobiyal                         | Goldthread ( <i>Coptis chinensis</i> ), Karanfil ( <i>Syzygium aromaticum</i> ), Mazı, Nar | Berberin, eugenol, gallotanenler            | Pamuk, yün, ipek     |
| UV koruma, antibakteriyel, antioksidan | Modifiye kurkumin ( <i>Curcuma longa</i> )   | Kurkumin-UV absorban reaktif kompleks       | İpek                 |
| Güve önleyici                          | Ceviz kabuğu ( <i>Juglans regia</i> )  | Juglon (5-hidroksi-1,4-naftokinon)          | Yün                  |
| Antibakteriyel, antioksidan            | <i>Lycium ruthenicum</i> Murray  | Açılasyonlu antosiyaninler                  | Yün                  |
| Antimikrobiyal, UV koruma              | <i>Quercus infectoria</i> , <i>Acacia catechu</i> , <i>A. nilotica</i> vb.                 | Tanen                                       | Pamuk                |
| UV koruma                              | Okaliptüs yaprağı ( <i>Eucalyptus camaldulensis</i> ), Portakal kabuğu, Karahindiba        | Tanenler, flavonoidler, karotenoidler       | Yün                  |
| UV koruma                              | Karanfil tomurcuğu, Meşe kabuğu  | Tanen                                       | İpek                 |
| UV koruma                              | Weld ( <i>Reseda luteola</i> ), Woad ( <i>Isatis tinctoria</i> )                           | Flavonoidler (luteolin, apigenin)           | Kenevir, keten       |
| UV koruma                              | Kına ( <i>Lawsonia inermis</i> )   | Lawsone                                     | Kasyonize pamuk      |
| UV koruma                              | Zerdeçal ( <i>Curcuma longa</i> )  | Kurkumin                                    | Polyester            |
| UV koruma                              | Koşinil ( <i>Dactylopius coccus</i> )  | Karminik asit                               | İpek, yün            |
| UV koruma, deodorant, antimikrobiyal   | Mazı, Areka cevizi, Nar kabuğu   | Gallotanenler, kateşinler, ellagik tanen    | İpek                 |
| UV koruma, antibakteriyel              | Gromwell ( <i>Lithospermum erythrorhizon</i> ), Muz kabuğu                                 | Deokşikikonin, tanenler                     | Pamuk                |
| Güve önleyici                          | Gümüş meşe, ceviz kabuğu, nar kabuğu   | >%40 tanen                                  | Yün                  |
| Deodorant                              | Gardenya ( <i>Gardenia jasminoides</i> ), kahve posası, nar                                | Krosin, kafein, ellagik asit                | Pamuk, ipek, yün     |

Çay (*Camellia sinensis*), yüksek antioksidan içeriği sayesinde tekstil renklendirmede kullanılan önemli bir doğal boya kaynağıdır. Kırmızı, siyah ve yeşil çay ekstraktlarının pamuk kumaşlarda uygulanması, doğal boyaların fonksiyonel performansını değerlendiren çalışmalar arasında yer almakta; pamuk liflerinin kitosan ile ön işlemden geçirilmesinin lif-boya etkileşimini artırarak boya alımını iyileştirdiği bildirilmektedir. Aynı çay türünden elde edilen ekstraktların, kullanılan özütleme yöntemine bağlı olarak farklı renk tonları ve UV koruma performansları sergileyebildiği; dolayısıyla elde edilen renk ve fonksiyonel özelliklerin çay türünden ziyade özütleme ve boyama koşullarıyla ilişkili olduğu vurgulanmaktadır. Bu bulgular, doğal boyalarla fonksiyonel tekstil üretiminde hammadde seçiminin yanı sıra proses parametrelerinin de belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır (Bonet-Aracil vd., 2016).

Ejder meyvesinden elde edilen tamamen yeni bir doğal boya kaynağının yün liflerine uygulanmasıyla canlı ve parlak renk tonları elde edilebildiği, aynı zamanda kumaşlara belirgin antibakteriyel özellikler kazandırdığı rapor edilmektedir. Bu bulgular, ejder meyvesi bazlı doğal boyaların fonksiyonel ve sürdürülebilir tekstil uygulamaları için umut verici bir alternatif sunduğunu göstermektedir (Sadannavar vd., 2024).

Tıbbi bir bitki olan Çin pelini (*Artemisia argyi*)'den elde edilen doğal biyo-boya/biyo-ajanın pamuk tekstillerde kullanımını genişletmek amacıyla plazma yüzey modifikasyonu ve soya proteini kaplamasının uygulanabilirliği incelenmiştir. Sonuçlar, soya kaplamasının tek başına doğal boya alımını artırdığını; plazma ön işlemiyle birlikte uygulandığında ise kumaşın boyanabilirliğinin daha da iyileştiğini göstermektedir. Plazma sonrası ultrasonik soya kaplaması, pamuk kumaşa yumuşak tuşe kazandırırken renk kuvveti ve UV koruma performansını artırmış; ayrıca antioksidan özelliklerin yanı sıra *Staphylococcus aureus*'a karşı %95–100 bakterisidal etki sağlayarak güçlü antibakteriyel performans sergilemiştir (Li vd., 2023).

*Justicia schimperiana* yaprak ekstraktının toksik olmayan doğal bir renklendirici olarak pamuk kumaşlara renk ve antibakteriyel özellik kazandırdığı çevre dostu bir yaklaşım rapor edilmiştir. Çalışmada özütleme çözücü yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Bakır sülfat, demir sülfat ve şap, eşzamanlı mordanlama yöntemiyle kullanılmış; boyanmış kumaşların antibakteriyel etkinliği *Staphylococcus aureus* ve *Escherichia coli* bakterilerine karşı değerlendirilmiştir. Sonuçlar, işlem görmüş pamuk kumaşların her iki patojene karşı istenen düzeyde antibakteriyel özellik sergilediğini göstermektedir (Tegegne vd., 2024).

Oksijenik fotogranüllerden elde edilen fikosiyanin, sürdürülebilir ve fonksiyonel bir doğal boya olarak tekstil uygulamalarında öne çıkmaktadır. Literatürde, sodyum fosfat tamponu ile uygulanan dondurma-çözme ve ultrason destekli özütlemenin yüksek verim sağladığı, amonyum sülfatla stabilize edilen fikosiyaninin ise depolamaya uygun olduğu bildirilmektedir. Tekstil uygulamalarında, çift mordanlama sonrası soğuk boyamada pamuk liflerinin ipeğe kıyasla daha yüksek boya afinitesi ve yıkama dayanımı sergilediği; buna karşılık ipek kumaşların daha yüksek antioksidan aktivite sunduğu raporlanmıştır. UV koruma açısından pamuk kumaşlar çok yüksek UPF değerleriyle üstün performans gösterirken, ipek kumaşların orta düzeyde koruma sağladığı belirtilmektedir. Bu bulgular, fikosiyaninin farklı lif türlerinde renk ve fonksiyonel özellik kazandırabilen çevre dostu bir doğal boya olduğunu ortaya koymaktadır (Nair vd., 2025).

Semizotu (*Portulaca oleracea L.*) bitkisinin doğal bir boyar madde kaynağı olarak tekstil uygulamalarındaki potansiyeli literatürde ele alınmıştır. Yapılan çalışmalarda, bitkinin optimum koşullarda ekstrakte edilmesiyle elde edilen boyaların moleküler yapıları ve nano ölçekli özellikleri incelenmiş; yün kumaşlardaki boyama mekanizması ve adsorpsiyon kinetiği değerlendirilmiştir. Bulgular, semizotu bazlı doğal boyaların yün kumaşlarda sentetik boyalara kıyasla daha yüksek renk derinliği ( $K/S = 23,53$ ) sağladığını, bunun yanı sıra yüksek ultraviyole koruma özelliği (UPF = 253,47) ve belirgin antibakteriyel aktivite (*Staphylococcus aureus* için %71,3; *Escherichia coli* için %37) kazandırdığını göstermektedir (Zhang vd., 2022).

Geri dönüştürülmüş nonwoven polyester kumaşların ilave mordan kullanılmadan kara halile (*Terminalia chebula*) doğal boyası ile boyanmasına yönelik çalışmalar yer almaktadır. Bulgular, kara

halile (T. chebula) boyasının geri dönüştürülmüş PET esaslı nonwoven kumaşlara kahverengi ton kazandırdığını, artan sıcaklık, süre ve konsantrasyonla boyanabilirliğin iyileştiğini göstermektedir. Ayrıca, sürtme ve ter haslığının yüksek düzeyde olduğu ve kumaşların belirgin antibakteriyel özellikler sergilediği rapor edilmektedir (Lee vd., 2020).

## 5.SONUÇ

Tekstil endüstrisi, yüksek üretim hacmi ve yoğun kimyasal kullanımı nedeniyle çevresel sürdürülebilirlik tartışmalarının merkezinde yer almakta; özellikle sentetik boyar maddelerden kaynaklanan atık sular, toksik yan ürünler ve yüksek kaynak tüketimi ekosistemler ve insan sağlığı üzerinde ciddi baskılar oluşturmaktadır. Bu bağlamda, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen ve çevreyle daha uyumlu yapıya sahip doğal boyalar, sürdürülebilir tekstil üretimi için yeniden önemli bir alternatif olarak gündeme gelmiştir.

Ancak doğal boyaların endüstriyel kullanımını sınırlayan düşük verim, renk tekrarlanabilirliği sorunları, yetersiz haslık, mordanlama gereksinimi ve yüksek su–enerji tüketimi gibi yapısal engeller bulunmaktadır. Literatür, bu sorunların yalnızca geleneksel yöntemlerle aşılamayacağını; ultrason, mikrodalga, enzimatik, fermantasyon, süperkritik akışkan ve basınçlı sıvı gibi ileri özütleme teknolojilerinin kaçınılmaz olduğunu göstermektedir. Yaşam döngüsü ve tekno-ekonomik analizler, başlangıç maliyetleri yüksek olsa da bu yöntemlerin uzun vadede önemli çevresel kazanımlar sunduğunu ortaya koymaktadır.

Doğal boyalar, çevre dostu renklendirmenin ötesinde UV koruma, antibakteriyel etki ve antioksidan aktivite gibi fonksiyonel özellikler kazandırabilme potansiyelleriyle de stratejik önem taşımaktadır. Nanoteknoloji, plazma yüzey modifikasyonu, biyopolimer destekli ön işlemler ve hibrit pigment sistemleri, lif–boya etkileşimini güçlendirerek renk performansını ve fonksiyonel dayanıklılığını artırmakta, metal mordanlara olan bağımlılığını azaltmaktadır.

Sonuç olarak, doğal boyamacılığın sürdürülebilir tekstil endüstrisinde kalıcı ve rekabetçi bir konum elde edebilmesi; ileri özütleme teknolojileri ile yenilikçi yüzey ve mordanlama yaklaşımlarının bütüncül biçimde entegrasyonuna, akademi–sanayi iş birliğinin güçlendirilmesine ve standartlaştırılmış yeşil üretim sistemlerinin yaygınlaştırılmasına bağlıdır.

**KAYNAKLAR**

1. Muruganandham, M., Tamilselvi, Y., Sivasubramanian, K., Velmurugan, P., Oleyan Al-Otibi, F., & Sivakumar, S. (2025). Sustainable dyeing of cotton, silk and leather using natural dye from *Bixa orellana* seeds: extraction, optimization and assessment of antibacterial activity. *Frontiers in Chemistry*, 13, 1474160. <https://doi.org/10.3389/fchem.2025.1474160>
2. Hossain, T., Das, S. C., Akhtarujjaman, M., Uddin, M. A., & Bedoura, S. (2023). Eco-friendly dyeing of cotton fabric using used tea bag extracts: A comprehensive study on pH, fabric cationisation, and computational analysis. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 7, 100387. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2023.100387>
3. Eyupoglu, C., Eyupoglu, S., Merdan, N., & Basyigit, Z. O. (2025). Natural Dyeing of Vacuum Plasma-Treated Silk Fabric with *Hypericum Perforatum* and Estimation of Dyeing Characteristics with an Optimizable Neural Network Model. *Fibers and Polymers*, 26, 2043–2056. <https://doi.org/10.1007/s12221-025-00936-x>
4. Olivar Aponte, N., Hernández Gómez, J., Torres Argüelles, V., & Smith, E. D. (2024). Fast fashion consumption and its environmental impact: a literature review. *Sustainability: Science, Practice and Policy*, 20(1), 2381871. <https://doi.org/10.1080/15487733.2024.2381871>
5. Islam, M. M., Aidid, A. R., Mohshin, J. N., Mondal, H., Ganguli, S., & Chakraborty, A. K. (2025). A critical review on textile dye-containing wastewater: Ecotoxicity, health risks, and remediation strategies for environmental safety. *Cleaner Chemical Engineering*, 100165. <https://doi.org/10.1016/j.clce.2025.100165>
6. Slama, H. B., Chenari Bouket, A., Pourhassan, Z., Alenezi, F. N., Silini, A., Cherif-Silini, H., Oszako, T., Luptakova, L., Golinska, P., & Belbahri, L. (2021). Diversity of synthetic dyes from textile industries, discharge impacts and treatment methods. *Applied Sciences*, 11(14), 6255. <https://doi.org/10.3390/app11146255>
7. Taha, A., & Gouda, S. (2025). Eco-friendly dye removal: Impact of dyes on aquatic and human health and sustainable fungal treatment approaches. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*, 29(1), 2733-2763. <https://doi.org/10.21608/ejabf.2025.414816>
8. Machado, V., Marinho, A., Vieira de Castro, P., & Silva, T. (2025). From fabric to finish: The cytotoxic impact of textile chemicals on humans health. *Textiles*, 5(2), 16. <https://doi.org/10.3390/textiles5020016>
9. Negi, A. (2025). Natural dyes and pigments: Sustainable applications and future scope. *Sustainable Chemistry*, 6(3), 23. <https://doi.org/10.3390/suschem6030023>
10. Dey, P., Dey, P., Hoque, M. B., Baria, B., Rahman, M. M., Shovon, S., & Das, D. (2025). Sustainable and eco-friendly natural dyes: a holistic review on sources, extraction, and application prospects. *Textile Research Journal*, 95(19–20) 2472–2499. <https://doi.org/10.1177/00405175251321139>
11. Danila, A., Muresan, E. I., Chirila, L., & Coroblea, M. (2021). Natural dyes used in textiles: a review. In *The 7th International Symposium TTPF* (52-59). <https://doi.org/10.2478/9788366675735-010>
12. Baaka, N., Khiari, R., & Haji, A. (2023). Ecofriendly dyeing of textile materials with natural colorants from date palm fiber fibrillium. *Sustainability*, 15(2), 1688. <https://doi.org/10.3390/su15021688>
13. Uddin, M. A., Rahman, M. M., Haque, A. N. M. A., Smriti, S. A., Datta, E., Farzana, N., ... & Sayem, A. S. M. (2022). Textile colouration with natural colourants: a review. *Journal of Cleaner Production*, 349, 131489. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131489>

14. Pranta, A. D., & Rahaman, M. T. (2024). Extraction of eco-friendly natural dyes and biomordants for textile coloration: a critical review. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 39, 101243. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101243>
15. López-Rodríguez, D., Jordan-Nunez, J., Mico-Vicent, B., & Belda, A. (2024). Printing and dyeing of halloysite nano clay hybrid with natural chlorophyll dye on cotton fabric. *Dyes and Pigments*, 231, 112352. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2024.112352>
16. Che, J., & Yang, X. (2022). A recent (2009–2021) perspective on sustainable color and textile coloration using natural plant resources. *Heliyon*, 8(10). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10979>
17. Yadav, S., Prajapati, H. C., Sonkar, S. P., Nigam, R. S., Chandravanshi, R., & Gupta, C. (2025). Innovations in natural dye production: bridging tradition and modern technology. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1568094. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1568094>
18. Buyukakinci, Y. B., Guzel, E. T., & Karadag, R. (2021). Organic cotton fabric dyed with dyer's oak and barberry dye by microwave irradiation and conventional methods. *Industria Textila*, 72(1), 30-38. <https://doi.org/10.35530/IT.072.01.1755>
19. Amin, N., Rehman, F. U., Adeel, S., Ahamd, T., Muneer, M., & Haji, A. (2020). Sustainable application of cochineal-based anthraquinone dye for the coloration of bio-mordanted silk fabric. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(7), 6851-6860. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06868-3>
20. Molla, W. T., Kebede, Z., Semagn, N., Adgo, A., & Godana, C. (2025). Sustainable reactive dyeing of polyester/cotton blend fabric via papain enzyme surface modification. *Scientific Reports*, 15(1), 40216. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-24150-0>
21. Gupta, V., Jose, S., Kadam, V., & Shakyawar, D. B. (2022). Sol gel synthesis and application of silica and titania nano particles for the dyeing and UV protection of cotton fabric with madder. *Journal of Natural Fibers*, 19(13), 5566-5576. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1881688>
22. Yuan, W., Grethe, T., & Mahltig, B. (2023). Sol-gel coatings with the fluorescence dye Rhodamine B for optical modification of cotton. *Communications in Development and Assembling of Textile Products*, 4(1), 1-17. <https://doi.org/10.25367/cdatp.2023.4.p1-17>
23. Mehrparvar, L., Safapour, S., Sadeghi-Kiakhani, M., & Gharanjig, K. (2016). Chitosan-polypropylene imine dendrimer hybrid: a new ecological biomordant for cochineal dyeing of wool. *Environmental Chemistry Letters*, 14(4), 533-539. <https://doi.org/10.1007/s10311-016-0559-1>
24. Bonet-Aracil, M. Á., Díaz-García, P., Bou-Belda, E., Sebastiá, N., Montoro, A., & Rodrigo, R. (2016). UV protection from cotton fabrics dyed with different tea extracts. *Dyes and Pigments*, 134, 448-452. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2016.07.045>
25. Barani, H., & Maleki, H. (2011). Plasma and ultrasonic process in dyeing of wool fibers with madder in presence of lecithin. *Journal of dispersion science and technology*, 32(8), 1191-1199. <https://doi.org/10.1080/01932691.2010.505525>
26. Gorjanc, M., Savić, A., Topalić-Trivunović, L., Mozetič, M., Zaplotnik, R., Vesel, A., & Grujić, D. (2016). Dyeing of plasma treated cotton and bamboo rayon with *Fallopia japonica* extract. *Cellulose*, 23(3), 2221-2228. <https://doi.org/10.1007/s10570-016-0951-9>
27. Haji, A. (2020). Natural dyeing of wool with henna and yarrow enhanced by plasma treatment and optimized with response surface methodology. *The Journal of the Textile Institute*, 111(4), 467-475. <https://doi.org/10.1080/00405000.2019.1642710>

28. López-Rodríguez, D., Jordan-Nunez, J., Mico-Vicent, B., & Belda, A. (2024). Printing and dyeing of halloysite nano clay hybrid with natural chlorophyll dye on cotton fabric. *Dyes and Pigments*, 231, 112352. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2024.112352>
29. Li, Z., Zhang, Y., Xia, W., Tang, Y., & Li, Q. (2023). Producing natural-colored super-powerful antibacterial cotton with plasma-assisted fiber surface modification: a green and effective cotton process for medical and healthcare applications. *Materials Advances*, 4(3), 932-939. <https://doi.org/10.1039/D2MA00701K>
30. Sadannavar, M. K., Periyasamy, A., Islam, S. R., Shafiq, F., Dong, X., & Zhao, T. (2024). Natural dyeing and antimicrobial functionalization of wool fabrics dyed with chinese dragon fruit extract to enhance sustainable textiles. *Sustainability*, 16(16), 6832. <https://doi.org/10.3390/su16166832>
31. Tegegne, W., Haile, A., Zeleke, Y., Temesgen, Y., Bantie, H., & Biyable, S. (2024). Natural dyeing and anti bacterial finishing of cotton fabric with extracts from *Justicia schimperiana* leaf extract: a step towards sustainable dyeing and finishing. *International Journal of Sustainable Engineering*, 17(1), 52-61. <https://doi.org/10.1080/19397038.2023.2301702>
32. Nair, V. K., Sahu, A., Samuchiwal, S., Malik, A., Ghosh, P., & Butola, B. S. (2025). Phycocyanin from oxygenic photogranules: A feasible ecofriendly dye for cotton and silk fibers. *Cleaner Materials*, 100334. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2025.100334>
33. Du, H., Yue, M., Huang, X., Duan, G., Yang, Z., Huang, W., ... & Yin, X. (2022). Preparation, application and enhancement dyeing properties of ZnO nanoparticles in silk fabrics dyed with natural dyes. *Nanomaterials*, 12(22), 3953. <https://doi.org/10.3390/nano12223953>
34. Zhang, W., Wang, X., Weng, J., Liu, X., Qin, S., Li, X., & Gong, J. (2022). Eco-dyeing and functional finishing of wool fabric based on *Portulaca oleracea* L. as colorant and *Musa basjoo* as natural mordant. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(2), 103624. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103624>
35. Arain, R. A., Ahmad, F., Khatri, Z., & Peerzada, M. H. (2021). Microwave assisted henna organic dyeing of polyester fabric: a green, economical and energy proficient substitute. *Natural Product Research*, 35(2), 327-330. <https://doi.org/10.1080/14786419.2019.1619721>
36. Taheri, M., Maleknia, L., Ghamsari, N. A., Almasian, A., & Fard, G. C. (2015). Effect of zirconium dioxide nanoparticles as a mordant on properties of wool with thyme: dyeing, flammability and antibacterial. *Oriental Journal of Chemistry*, 31(1), 85. <http://dx.doi.org/10.13005/ojc/310109>
37. Lee, J. H., Jung, J. S., & Kim, S. H. (2020). Dyeing and antibacterial properties of chemically recycled PET thermal-bonded nonwovens dyed with *Terminalia chebula* dye. *Polymers*, 12(8), 1675. <https://doi.org/10.3390/polym12081675>
38. Pour, R. A., Bagheri, R., Naveed, T., Ali, N., Rehman, F., & He, J. (2020). Surface functionalization of wool via microbial-transglutaminase and bentonite as bio-nano-mordant to achieve multi objective wool and improve dyeability with madder. *Heliyon*, 6(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04911>



//

# Bölüm 9

## ERZURUM - AZIZIYE - ÖZBEK KÖYÜ ARAZI TOPLULAŞTIRMA PROJESİNİN TEKNİK ANALIZI

*Erman BENGİN<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Öğr. Gör., Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Göksun Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, ermanbengin@ksu.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-6492-956X

## Giriş

Dünya nüfusundaki artış ve teknolojideki gelişmelere bağlı olarak doğal kaynaklar üzerinde antropojenik baskı her geçen gün artmaktadır. Barınma, ulaşım, tarım, hayvancılık, ormancılık gibi beşeri faaliyetler teknolojinin etkili kullanımıyla birlikte arazi ihtiyacı giderek artmaktadır (Denizdurduran, vd., 2012). Arazi planlamalarında kontrolsüz gerçekleşen müdahaleler ve arazilerin amaç dışı kullanılması birçok çevre sorununu ortaya çıkartmaktadır (Gürbüz, vd., 2012). Türkiye’de tarım potansiyelinin yüksek olduğu arazilerin sınırlı olması nedeniyle bu arazilerin etkili bir biçimde planlanması gerekmektedir. Söz konusu arazilerin amaç dışı kullanılmasının yanı sıra diğer ciddi bir problem de tarım arazilerinin miras yoluyla bölünmesidir. Bu durum mevcut arazilerin parçalanması ve akabinde tarımsal faaliyetlerde verimliliğin kısıtlanması olarak karşımıza çıkmaktadır (Bengin ve Acar, 2018; Sözen ve Çay, 2025). Yürürlükteki mevzuatlarımızda arazi parçalanmasının engellenmesine yönelik yasal düzenlemeler yer almasına rağmen, yaşanan süreç ve sosyolojik tabanlı gerekçeleri içerisinde tarım arazilerinde ‘ekonomik bir işletmeciliğe imkân vermeyecek şekilde’ parçalanma eğiliminin halen daha devam ettiği görülmektedir (İnam ve Akdeniz, 2025). Bir işletmenin mülkiyetinde olan arazilerin çok sayıda küçük ve dağınık parseller halinde bulunması, modern tarım tekniklerinin kullanımını güçleştirerek üretim maliyetlerini arttırmakta ve tarımsal verimi düşürmektedir (Çay vd., 2025). Bu yapısal sorunu gidermek amacıyla Türkiye’de arazi toplulaştırması uygulamaları başlatılmıştır (Çay ve Sözen, 2022). İlk toplulaştırma çalışması 1961 yılında Konya ili Karkın Köyü’nde gerçekleştirilmiş, sonraki yıllarda arazi toplulaştırması ülke genelinde aşamalı olarak yaygınlaşmıştır (Karataş ve Sözen, 2017; Acar ve Bengin, 2018). 1980’lerden itibaren yasal düzenlemelerle hız kazanan toplulaştırma çalışmaları, 2000’li yıllarda gelişen teknik altyapı ve artan kamu yatırımları sayesinde milyonlarca hektar alana ulaşmıştır (Acar, 2023).

Günümüzde arazi toplulaştırması, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı planlama araçları ve modern ölçüm teknolojileri ile desteklenen kapsamlı bir süreç haline gelmiştir (Köseoğlu ve Gündoğdu, 2004). Tarım ve Orman Bakanlığı koordinasyonunda yürütülen projelerde kadastro verileri dijital ortamda analiz edilerek, Devlet Su İşleri müdürlükleri ile beraber uyum içerisinde yeni parsel ve blok düzenleri planlanmaktadır. Böylece arazi düzenleme işlemleri büyük bir hassasiyetle gerçekleştirilirken, yol, sulama kanalı ve altyapı yatırımları da araziye en uygun şekilde konumlandırılmaktadır.

Arazi toplulaştırmasının temel hedefi, tarımsal işletmelere ait dağınık ve küçük parçaları bir araya getirerek daha büyük, düzenli (Manavbaşı, 2012; Sözen ve Karataş, 2015) ve verimli tarım parselleri oluşturmaktır (Kahyaoğlu, 2018). Parçalı arazi yapısında bir tarladan diğerine geçmek için harcanan zaman ve yakıt, toplulaştırma sonrasında büyük ölçüde azalmakta (Kuzu vd., 2018); böylece işletme bazında iş gücü (Oğuz ve Bayramoğlu, 2004) ve maliyet tasarrufu (Çay ve Sözen, 2023) sağlanmaktadır (Akdeniz vd., 2022; Akdeniz vd., 2023). Ayrıca, küçük parsellerin birleştirilmesiyle ortalama parsel büyüklüğü artmakta ve bu da modern tarım makinelerinin etkin kullanımını mümkün kılmaktadır (Ayrancı, 2004). Parçalanmış arazilerde sık karşılaşılan sulama zorlukları ve altyapı eksiklikleri de toplulaştırma projeleriyle giderilerek tarımsal üretimde sürdürülebilir artış sağlanmaktadır (Arslan ve Tunca, 2013).

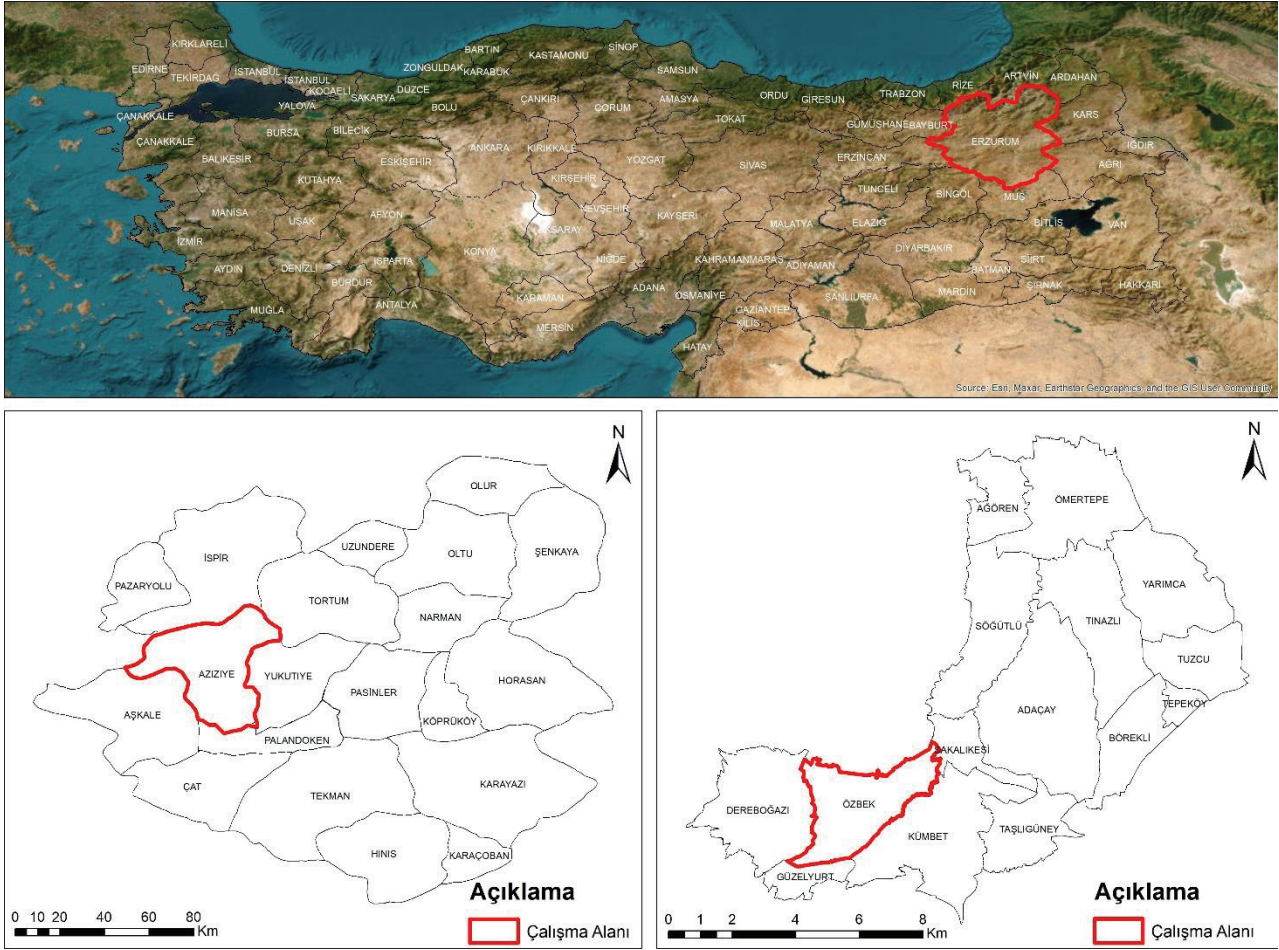
Toplulaştırma sürecinin başarısını değerlendirmede, parsel büyüklüğü ve parsel şekillerindeki düzenlemeler başta olmak üzere bazı teknik göstergeler belirleyici rol oynar (Akdeniz ve Acar, 2023; Acar ve Akdeniz, 2023). Başarılı bir toplulaştırma projesinde ortalama parsel büyüklüğünün belirgin

şekilde artması beklenir (Akdeniz ve Temizel, 2018). Parsellerin daha geniş ve geometrik olarak düzgün şekle sahip olması tarla içi tarımsal faaliyetleri kolaylaştırır ve toprak kullanım verimliliğini artırır (Seyyar, 2019). Tarımsal faaliyetlerin istenilen düzeyde yapılabilmesi, birim alandan elde edilen verimin en yüksek seviyede olması ile mümkündür (Pakdemirli vd., 2021). Proje öncesi özellikle şekilsiz parsellerin olması tarımsal alan kaybını büyük ölçüde arttırmaktadır (Zeng vd., 2018; Kurşun vd., 2023). Parsel şekillerinin düzenlenmesi ile beraber tarımsal alan kaybında da belirgin düşüşler meydana gelecektir (Akkaya Aslan, 2021; Kontek vd., 2023). Toplulaştırma öncesine kıyasla her işletmeye düşen parsel sayısının azalması da arazinin parçalanmışlık düzeyinin düştüğünü gösterir (Zeng vd., 2018; Batykova, 2024). Bununla birlikte, toplulaştırma sırasında yol, sulama kanalı ve altyapı için ayrılan alan nedeniyle bir miktar tarımsal alan kaybı kaçınılmazdır. Bu nedenle proje alanından ortak kullanım alanlarına ayrılan kesinti oranı değeri olabildiğince düşük tutulmalıdır. Genellikle %5 düzeyinde olan kesinti oranının yasal üst sınırı %10 olarak belirlenmiştir. Kesinti oranının düşük tutulması, sosyal kabulü ve çiftçi memnuniyetini doğrudan etkilemesi açısından önemli bir faktördür.

Parsel büyüklüğü, toplulaştırma oranı, parsel şekli, kesinti oranı ve tarımsal alan kaybı gibi temel göstergelerin değerlendirilmesi, toplulaştırma çalışmalarının performansını ve başarısını ortaya koymak aynı zamanda geleceğe yönelik planlamalara bilimsel temel oluşturmak açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma söz konusu göstergeleri merkeze alarak arazi toplulaştırmasının başarısını etkileyen faktörleri teknik açıdan irdelemekte ve kırsal alanlarda sürdürülebilir tarımsal faaliyetlerin yapılmasına katkı sunmayı hedeflemektedir.

### **Materyal ve Metod**

Çalışmada Erzurum İli Aziziye İlçesi Özbek Köyü sınırlarında yer almaktadır (Şekil 1). Sakalikesik Ovası arazi toplulaştırma ve tarla içi geliştirme hizmetleri projesine ait tescile esas öznitelik ve sayısal verilerinden faydalanılmıştır. Proje kapsamında Aziziye ilçesinde 15 köy yer almakta ve toplam alanı yaklaşık 12500 hektar alandan oluşmaktadır. Çalışma alanı olarak belirlenen Özbek Köyü 810 hektar yüzölçümü ile düzenleme tabi tutulmuştur.



Şekil 1. Özbek Köyü Lokasyon Haritası

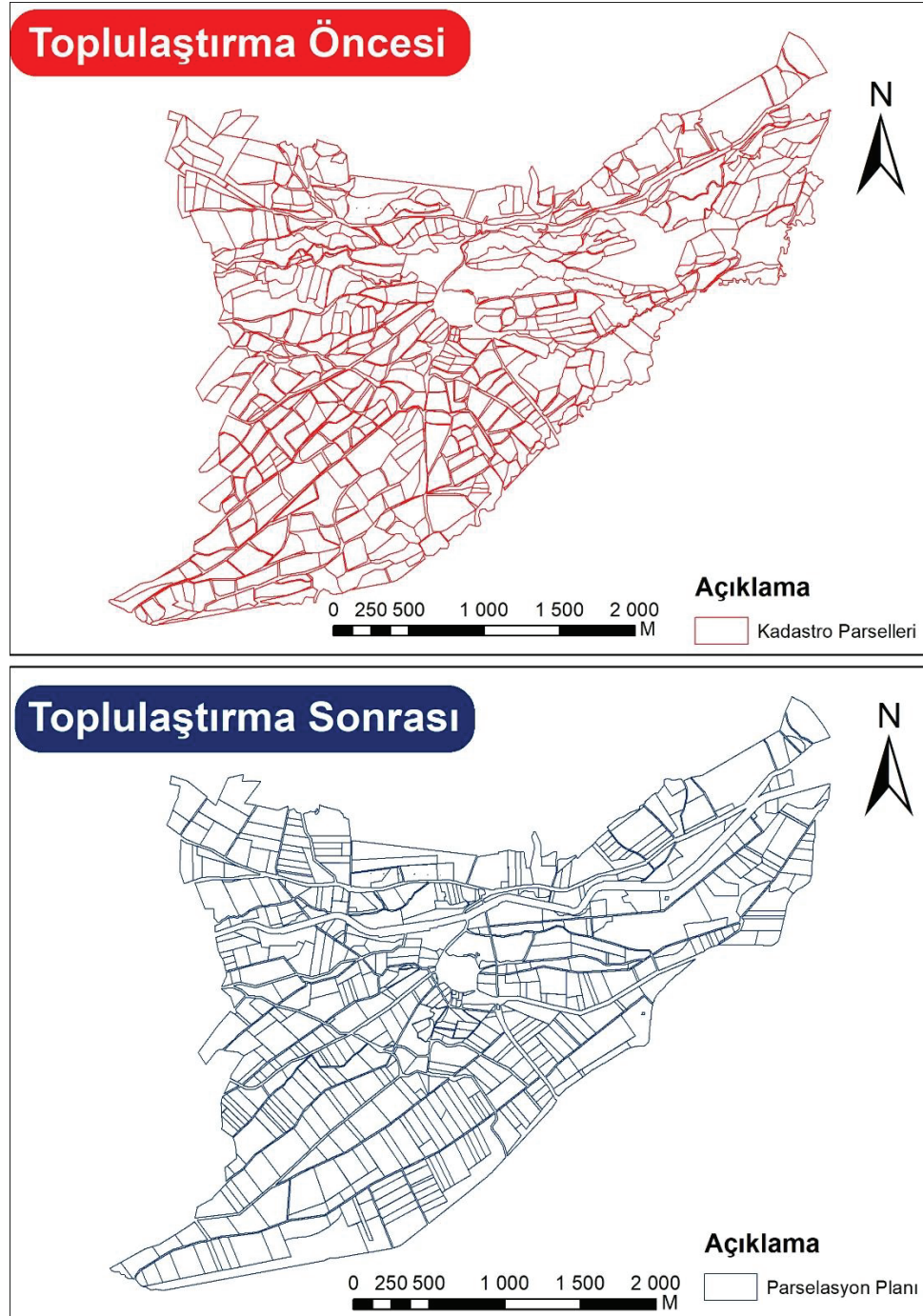
Arazi toplulaştırma projesi tamamlanmış çalışma, Tarım ve Orman Bakanlığı, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü 8. Bölge Müdürlüğü tarafından yürütülmüştür. Erzurum ili Aziziye ilçesinde yapılan arazi toplulaştırma ve tarla içi geliştirme hizmetleri proje verileri 8. Bölge Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Toplulaştırma öncesi (kadastral durum) ve toplulaştırma sonrası (parselasyon planı) verilerin değerlendirilmesinde, LiTop yazılımı kullanılarak analizler yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre haritaların oluşturulmasında ArcGIS ve LiCad yazılımları kullanılmıştır. Düzenleme kapsamında toplulaştırma öncesi ve sonrası parsellerin şekilleri, mülkiyet durumu, ortalama arazi büyüklüğü, tarımsal alan kaybı, toplulaştırma oranı ve proje sahasındaki kesinti oranı incelenecektir.

### Araştırma Bulguları ve Tartışma

Özbek Köyü toplulaştırma projesi kapsamında toplam 442 adet işletme vardır. Proje öncesinde düzenlemeye alınan toplam 8103.17 dekar parsel alanı, 644 adet parsel ve bu parsellerin ortalama parsel büyüklüğü 12.58 dekar olarak hesaplanmıştır. Proje sonrası toplam 7579.01 dekar parsel alanı, 561 adet parsel ve bu parsellerin ortalama parsel büyüklüğü 13.51 dekar olarak hesaplanmıştır (Tablo 1). Bu durum proje sahasında yer alan küçük parsel gruplarının birleştirilerek tarımsal faaliyetlerin ideal bir şekilde yapılmasını kolaylaştıracaktır. Proje sahasına ait proje öncesi ve sonrası durum haritası Şekil 2'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Özbek Köyü Proje Özeti

|                           | Proje Öncesi AT | Proje Sonrası AT |
|---------------------------|-----------------|------------------|
| Parsel Alanı (da)         | 8103.17         | 7579.01          |
| Parsel Sayısı             | 644             | 561              |
| Ortalama Parsel Büyüklüğü | 12.58           | 13.51            |

**Şekil 2.** Toplulaştırma Öncesi ve Sonrası Parselasyon Haritası

Toplulaştırma projesindeki parsellerin parsel büyüklüklerine göre dağılımı incelendiğinde 0-5 dekar aralığında proje öncesinde ve sonrasında %34.01'den %31.91'e düşerek küçük parsel gruplarında azalma görülmektedir (Tablo 2). İdeal parsel gruplarından olan 21-50 dekar aralığında yaklaşık % 3'lük bir artış görülmektedir. Diğer parsel gruplarında küçük artış ve azalışlar olmakla

beraber, proje genelinde toplam değerlere bakıldığında parsellerin alansal gruplarının büyüklük ortalamasında artışlar tespit edilmiştir. Ortalama parsel büyüklüğünün artması tarımsal üretim verimliliğini arttıracakı ön görülmektedir.

**Tablo 2.** Özbek Köyü Parsel Büyüklüklerine Göre Dağılımı

| Parsel Grupları (Da) | Toplulaştırma Öncesi |               |                                | Toplulaştırma Sonrası |               |                                |
|----------------------|----------------------|---------------|--------------------------------|-----------------------|---------------|--------------------------------|
|                      | Parsel Sayısı        | %             | Ortalama Parsel Büyüklüğü (Da) | Parsel Sayısı         | %             | Ortalama Parsel Büyüklüğü (Da) |
| 0 - 5                | 219                  | 34.01         | 2.52                           | 179                   | 31.91         | 3.12                           |
| 6 - 10               | 155                  | 24.07         | 8.54                           | 141                   | 25.13         | 8.41                           |
| 11 - 20              | 176                  | 27.33         | 15.11                          | 147                   | 26.20         | 15.29                          |
| 21 - 50              | 79                   | 12.27         | 29.21                          | 85                    | 15.15         | 32.48                          |
| 51 - 100             | 13                   | 2.02          | 67.17                          | 6                     | 1.07          | 64.50                          |
| 101 - 500            | 2                    | 0.31          | 192.87                         | 3                     | 0.53          | 146.60                         |
| <b>Toplam</b>        | <b>644</b>           | <b>100.00</b> | <b>12.58</b>                   | <b>561</b>            | <b>100.00</b> | <b>13.51</b>                   |

Tarımsal üretim faaliyetleri için parsellerin geometrik şekli tarımsal mekanizasyona etki eden kriterler arasında olmakla birlikte uygun parsel geometrisinin en boy oranı 1/3 ile 1/7 arasında olan dikdörtgen olması gerekmektedir. Modern tarımın uygulanabilmesi için ihtiyaç duyulan makinalı tarım faaliyetleri için parsel şekilleri büyük önem taşımaktadır. Parsellerin geometrik şekillerine göre sıralamasında dikdörtgenden sonra kare, yamuk, şekilsiz ve üçgen literatürde yerini almıştır. (Acar ve Akdeniz, 2023).

Çalışma alanında yapılan parsel şekil analizinde dikdörtgen parsel sayısı yaklaşık %4'den %21'e yükselmiş %17'lik bir artış olduğu görülmektedir. Yamuk parsel sayısı yaklaşık %20 azalmıştır. Kare parsel şekline sahip parsel sayısı yaklaşık %7 artmış, üçgen şekline sahip parsel sayısı yaklaşık %2, şekilsiz parsel sayısı yaklaşık %36 düşmüştür. Tarıma elverişli olmayan şekilsiz parseller proje öncesi ve sonrası değerlendirildiğinde hissedilir oranda şekilleri düzenlenerek tarıma elverişli şekillerden olan dikdörtgen ve yamuk parsellere dönüştüğü tespit edilmiştir (Tablo 3).

**Tablo 3.** Özbek Köyü Parsel Şekilleri

| Parsel Şekli  | Proje Öncesi |               | Proje Sonrası |               |
|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
|               | Sayı         | %             | Sayı          | %             |
| Üçgen         | 53           | 8.23          | 34            | 6.06          |
| Kare          | 4            | 0.62          | 11            | 1.96          |
| Dikdörtgen    | 26           | 4.04          | 117           | 20.86         |
| Yamuk         | 112          | 37.61         | 211           | 17.39         |
| Şekilsiz      | 449          | 69.72         | 188           | 33.51         |
| <b>Toplam</b> | <b>644</b>   | <b>100.00</b> | <b>561</b>    | <b>100.00</b> |

Tarımsal üretimde makinalar çalışırken parsel sınırlarında araziye sürme faaliyetleri yapılamamaktadır. Gerek parsel sınırlarında yer alan sınır taşları gerekse makinaların manevra kabiliyetlerinden kaynaklı tarımsal olarak kullanılmayan alan oluşmaktadır. Bu alanlar tarımsal alan kaybı olarak değerlendirilmektedir. Yapılan çalışmalar doğrultusunda parsel sınırlarında en az 50

cm'lik kısım tarımsal olarak kullanılamamaktadır. Proje sahasında toplulaştırmadan önce ve toplulaştırmadan sonra oluşan parsellerde tarımsal alan kaybını hesaplamak için parsellerde iç alanlar oluşturularak ekilebilir tarım alanı hesaplanmıştır. Toplam parsel alanları ve ekilebilir tarım alanları arasındaki fark ile tarımsal alan kaybı hesaplanmıştır. Çalışma alanında yapılan analiz ve hesaplama neticesinde proje öncesinde 189 538.59 m<sup>2</sup> olan tarımsal alan kaybı proje sonrasında 142 968.91 m<sup>2</sup>'ye düşmüştür. Arazi toplulaştırma projesi ile tarımsal alan kaybı yaklaşık olarak %25 azalmıştır. Yaklaşık 40 dekarlık tarımsal alan kaybı değeri üretim faaliyetleri açısından bakıldığında azımsanmayacak ölçüdedir.

**Tablo 4.** Özbek Köyü Tarımsal Alan Kaybı

|                   | <b>Toplam Alan<br/>(m<sup>2</sup>)</b> | <b>Toplam Ekilebilir Alan<br/>(m<sup>2</sup>)</b> | <b>Tarımsal Alan Kaybı<br/>(m<sup>2</sup>)</b> |
|-------------------|--|---|--|
| <b>AT Öncesi</b>  | 8149449.98                             | 7959911.38  | 189538.59                                      |
| <b>AT Sonrası</b> | 7578280.78                             | 7435311.87  | 142968.91                                      |

Arazi toplulaştırma projelerinde proje kapsamında oluşturulan ortak tesislere alan sağlamak için düzenlemeye tabi tutulan tüm parsellerden hisseleri oranında kesinti yapılmaktadır. Yapılacak olan kesinti oranı için toplulaştırma mevzuatı %10'a kadar bedelsiz yapılabileceğini hüküm altına almıştır (Acar, 2023). Çalışma alanında yapılan düzenleme kapsamında kesinti oranı % 6.0352 olarak hesaplanmış ve düzenlemeye dâhil edilen tüm parsellerden bu oranda kesinti yapılmıştır.

Toplulaştırma projelerinin başarı kriterinin değerlendirilmesinde toplulaştırma oranı kullanılmaktadır. Proje sahasında düzenleme öncesi 644 parsel düzenlemeye dâhil edilmiş ve düzenleme sonrasında 561 parsel ile tamamlanmıştır. Proje sahasında %12.89 toplulaştırma oranına ulaşılmış ve tescil işlemleri gerçekleştirilmiştir.

### **Sonuç ve Öneriler**

Arazi toplulaştırma projeleri tarımsal üretim yapılan alanlarda parsel bazında mekânsal değişikliklere olanak sağlamaktadır. Parsellerin konumlarıyla birlikte şekil ve boyutlarında da düzenlemeler yapılmaktadır. Tarımsal alanlarda bulunan parsellerin geometrik şekilleri arazinin sürülmesinden hasat işlemlerine kadar üretim maliyetinde ve iş gücü kolaylığında etkili bir kriter olarak görülmektedir. Tarımsal üretim için en ideal geometriye sahip parsellerde iş gücünün ve yakıt maliyetlerinin en az seviyede olduğu bilinmektedir. Tarımsal üretim alanlarının büyük parsellere dönüşmesi parsel sınırlarında kaybı azaltarak ekilebilir alanları arttırmaktadır. Yapılan düzenlemeler ile tarımsal alanlarda ulaşım ağı güçlendirilmekle birlikte sulama ve tahliye sistemlerinin de dâhil edilmesiyle ürün desenine ve verimliliğine katkıda bulunmaktadır. Bu bağlamda toplulaştırma projelerinin tarımsal üretime katkısının değerlendirilmesi ve proje sonrası araştırmaların yapılması büyük önem taşımaktadır.

Çalışma alanında parsellerin geometrik şeklinde proje öncesine göre üçgen ve şekilsiz parsel şekillerinin ciddi oranda azaldığı dikdörtgen, yamuk ve kare şekilli parsel sayısında artış olmuştur. En fazla artışın gerçekleştiği dikdörtgen ve yamuk şekilli parseller tarımsal üretim için en uygun şekiller olarak ifade edilmektedir. Tarımsal üretimi arttırmak için üçgen parsel ve şekilsiz parsel şekilleri tamamen ortadan kalkmasa da azalma eğilimi göstermiştir. Parsel şekillerinin tam anlamıyla düzeltilememesi mahalle dış sınırlarının geometrik yapısının bozuk olması, işletme sahiplerinin arazisi üzerinde bulunan sabit tesisleri, yol ve sulama sistemlerinin doğrusal olarak yapılamaması gibi

sebeplerden kaynaklanmaktadır. Yapılan çalışmalarda proje sahası dış sınırı için sınır düzeltmesi yapılması parsel geometrilerinin düzelmesinde büyük oranda katkı sağlayacaktır. Bu sayede blok planlamaları ve buna istinaden parsel şekilleri daha doğrusal ve tarıma elverişli hale gelecektir.

Özbek Köyü'nde yapılan projede %12.89 toplulaştırma oranına ulaşılmıştır. Aynı işletmeye ait dağınık ve parçalı araziler bir araya getirilerek birleştirilmiş ve geometrik şekillerde de etkisini göstermiştir. Proje sahasındaki ortalama parsel büyüklüğü 12.58 dekardan 13.51 dekara çıkmış yaklaşık olarak %7.5 oranında artış gerçekleşmiştir. Parseller bir araya getirilerek toplam parsel sınır uzunluğu azalmakta ve tarımsal üretim için kullanılabilir alan artmaktadır.

Özbek Köyü için yapılan analizler neticesinde arazi toplulaştırma ve tarla içi geliştirme hizmetleri projesinin başarılı olduğu görüşüne varılabilmektedir. Yapılan arazi düzenlemesi ile proje öncesi ve proje sonrası durum kıyaslandığında olumlu yönde fayda sağlanacağı öngörülmektedir. Toplulaştırma projelerinin tarımsal üretim maliyetlerinin azalmasına katkısı hemen görülmesine rağmen, üretim verim artışında sağlanacak fayda biraz zaman alabilmektedir. Proje sahasında çiftçilerin mülakat aşamasında daha ayrıntılı bilgilendirilmesi ve toplulaştırma çalışmalarının çiftçiye sağlayacağı faydalar ve olanakların daha ayrıntılı olarak anlatılması proje başarı oranının artmasında katkı sağlayacaktır.



## Kaynakça

- Acar, Ö. (2023). Balıkesir- Manyas – Akçaova Köyü Toplulaştırma Projesi Teknik Analizi. Fazıl Nacar (Ed.), *Mekansal Bilgi ve Analiz* (s. 32-47). Bidge Yayınları, ISBN: 978-625-6707-28-3
- Acar, Ö., & Akdeniz, H. B. (2023). Arazi toplulaştırma projelerinin parsel şekil değişimine etkisinin analizi: Manyas/Salur mahallesi örneği, Türkiye. *Tarımsal Eski Sorunlara Yeni Yaklaşımlar*. İksad Yayınevi, Ankara, Türkiye, 81-101.
- Acar, Ö., & Bengin, E. (2018). Yozgat (Baştürk Köyü) arazi toplulaştırma projesinin bölgesel kalkınma açısından değerlendirilmesi. *Uluslararası Bozok Sempozyumu*, 3-5 Mayıs, Bozok Üniversitesi, Yozgat.
- Akdeniz, H. B., & Acar, Ö. (2023). Arazi toplulaştırma projelerinin arazi parçalanması değişimine etkisi bakımından değerlendirilmesi: Manyas/Yeniköy mahallesi örneği, Türkiye. *Tarımsal Eski Sorunlara Yeni Yaklaşımlar*. İksad Yayınevi, Ankara, Türkiye, 103-121.
- Akdeniz, H. B., Çay, T., & İnam, Ş. (2022). Evaluation of land consolidation impact criteria for rural development. *Intercontinental Geoinformation Days*, 4, 151-154.
- Akdeniz, H. B., İnam, Ş., & Çay, T. (2023). Türkiye’de uygulanmış arazi toplulaştırma projelerinin kırsal kalkınmaya etkisi bakımından değerlendirilmesi. *ÇOMÜ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 11(1), 18-30.
- Akdeniz, M., & Temizel, K. E. (2018). Arazi toplulaştırma projelerinde başarının değişik göstergelere göre değerlendirilmesi. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 33(2), 149-161.
- Akkaya Aslan, Ş. T. (2021). Evaluation of land consolidation projects with parcel shape and dispersion. *Land Use Policy*, 105, 105401.
- Arslan, H., & Tunca, E. (2013). Arazi Toplulaştırmasının Sulama Projelerinin Performansı Üzerine Etkileri. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 28(3), 126-133.
- Ayrancı, Y. (2004). An Approach Determining of Optimum Length/Width Ratio in A Parcel. *Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences*, 18(33), 1-7.
- Batykova, A., Ercan, O., Tuleev, T., & Erciyes, A. H. (2024). A Comparative Analysis of Land Fragmentation and Consolidation Practices, Policy Responses in Türkiye And Kyrgyzstan. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 12(3), 630-651.
- Bengin, E., & Acar, Ö. (2018). Yozgat ilinin tarımsal kalkınmasında kırsal alan düzenlemesinin önemi. III. Uluslararası Bozok Sempozyumu, 3-5 Mayıs, Bozok Üniversitesi, Yozgat.
- Çay, T., & Sözen, M. N. (2022). Türkiye’de yapılan Tarım Şuralarının Tarım Reformu Yönünden Değerlendirilmesi. *International Conference On Emerging Sources In Science*, 26-27 May, İstanbul, Türkiye, s.136-149. ISBN: 978-605-73747-1-4.
- Çay, T., & Sözen, M. N. (2023). Comparison of different valuation methods in land consolidation studies. *Intercontinental Geoinformation Days*, 6, 400-402.
- Çay, T., Acar, Ö., & Sözen, M.N. (2025). Comparison of distribution models in land consolidation projects: Kırşehir-Mucur-Kepez village example. In: 10th International Cukurova Agriculture and Veterinary Congress, 22-23 June, Adana, Türkiye, pp: 1375- 1386.
- Denizdurduran, M., Kızılelma, Y. ve Karabulut, M., (2012) Kahramanmaraş Ovası ve Çevresinde Arazi Kullanımı Arazi Örtüsünde Meydana Gelen Değişimlerin İncelenmesi ve Amaç Dışı Arazi Kullanımının Tespiti, Coğrafyacılar Derneği Uluslararası Kongresi Bildiriler Kitabı, Sayfa: 410-417, 4-6 Haziran, Muğla.

- Gürbüz, M., Denizdurduran, M., Karabulut, M., Kızılelma, Y. (2012). Uzaktan Algılama ve CBS Kullanılarak Elbistan Ovasında Arazi Kullanımı / Arazi Örtüsünde Meydana Gelen Değişimlerin İncelenmesi. *KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi (Özel Sayı)*, 30-37.
- İnam, S., & Akdeniz, H.B. (2025). Türkiye’de arazi toplulaştırma projelerinin kırsal kalkınma amaçlı yapılması gerekliliği üzerine bir çalışma. Serüven Yayınevi, Ankara, Türkiye, 33-51
- Kahyaoğlu, S. B. (2018). Tarım Sektöründe Kurumsallaşmanın Bileşenleri Olarak Arazi Toplulaştırılması ve Kooperatifleşme. *Üçüncü Sektör Sosyal Ekonomi Dergisi*, 53(2), 533-548.
- Karataş, K., & Sözen, M. N. (2017). Evaluation of the land consolidation studies done for various purposes in Turkey. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, 17, 299-306.
- Kontek, P., Basista, I., & Maciuk, K. (2023). GIS analyses of land consolidation in case of the highly fragmented of parcels. *Folia Forestalia Polonica. Series A. Forestry*, 65(3).
- Köseoğlu, M., & Gündoğdu, K. S. (2004). Arazi toplulaştırma planlama çalışmalarında uzaktan algılama tekniklerinden yararlanma olanakları. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 18(1), 45-56.
- Kurşun, E., Konukcu, F., & Altürk, B. (2023). Evaluation of agricultural parcels in terms of land consolidation with shape analysis in Tekirdağ province.
- Kuzu, H., Arslan, F., & Değirmenci, H. (2018). Arazi toplulaştırma projelerinde yol uzunluklarının analizi: Şanlıurfa Türkeli Köyü örneği. *Ziraat Fakültesi Dergisi*, 19-25.
- Manavbaşı, İ. D., 2012. "Sivas İli Ulaş İlçesi Karacalar Köyü Arazi Toplulaştırma Çalışması ve Uygun Yağmurlama Sulama Sisteminin Projelenmesi" Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi Tarımsal Yapılar ve Sulama A.B.D., Ankara
- Oğuz, C., & Bayramoğlu, Z. (2004). The Effect of Different Parcel Size on Production Costs after Land Consalidation in Çumra District of Konya Province: Küçükköy Case. *Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences*, 18(34), 70-75.
- Pakdemirli, B., Birişik, N., Aslan, İ., Sönmez, B., & Gezici, M. (2021). Türk tarımında dijital teknolojilerin kullanımı ve tarım-gıda zincirinde Tarım 4.0. *Toprak Su Dergisi*, 10(1), 78-87.
- Seyyar, E. K. (2019). Arazi toplulaştırma çalışmalarının sosyal ve ekonomik yönden analizi: Kırıkkale İli–Delice İlçesi köy toplulaştırma çalışma örneği (Master's thesis, Ankara Üniversitesi (Turkey)).
- Sözen, M. N., & Çay, T. (2025). Land Grading Analysis Based on Farmer Opinions Using Fuzzy AHP. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 8(6), 1794-1801. <https://doi.org/10.34248/bsengineering.1780985>
- Sözen, M. N., & Karataş, K. (2015). Investigation Of the Vertical Dimension Restricted Real Estates In Land Consolidation Projects. In *The World Cadastre Summit-Congress & Exhibition* (pp. 20-25).
- Zeng, S., Zhu, F., Chen, F., Yu, M., Zhang, S., & Yang, Y. (2018). Assessing the impacts of land consolidation on agricultural technical efficiency of producers: A survey from Jiangsu Province, China. *Sustainability*, 10(7), 2490.

# Bölüm 10

## MEMBRAN ÜRETİMİNDE POLİVİNİLİDEN FLORÜR (PVDF) VE POLİETER SÜLFON (PES) TÜREVİ POLİMERLERİN KULLANIMI

*Aysel AYDIN KOCAEREN<sup>1</sup>, Emine ÇELEBİ<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Doç. Dr, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi Bölümü, Kimya Eğitimi ABD, aysel.kocaeren@comu.edu.tr, ORCID No: 0000-0003-4113-0517.

<sup>2</sup> Yüksek Lisans Öğrencisi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, eminecelebi5382@gmail.com.

Günümüzde endüstriyel faaliyetlerin artmasıyla birlikte ortaya çıkan kompleks içerikli atık sular, geleneksel arıtma yöntemleriyle yeterli düzeyde arındırılmamakta, bu da çevresel ve halk sağlığı açısından ciddi tehditler oluşturmaktadır (Zhao vd., 2022). Mevcut tekniklerin yüksek maliyetli, enerji yoğun ve sürdürülebilirlikten uzak olması, yeni nesil arıtma çözümlerine duyulan ihtiyacı artırmıştır (Judd, 2006). Bu bağlamda, biyoyumlu ve çevre dostu polimerlerden geliştirilen kompozit membranlar hem düşük maliyetli üretim imkânı hem de yüksek arıtma verimliliği ile önemli bir alternatif sunmaktadır (Wu vd., 2021). Polimerik membranlar iyi film oluşturma, esneklik, dayanıklılık, ayırma özellikleri ve düşük maliyet gibi avantajları nedeni ile membran ayırma proseslerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Yang vd., 2007). Çalışmanın temel gerekçesi, Poliviniliden florür (PVDF), Polietersülfon (PES) ve Sodyum aljinat (SA) gibi polimerlerin belirli oranlarda birleştirilerek hazırlanacak membranların, baraj kaynaklı atık sulardaki ağır metaller ve organik kirleticiler gibi zararlı bileşenleri etkin biçimde uzaklaştırma potansiyelinin ortaya konmasıdır. Ayrıca, bu membranların yeniden kullanılabilirlik özelliklerinin değerlendirilmesiyle sürdürülebilir, ekonomik ve uygulanabilir arıtma teknolojilerine katkı sağlanması hedeflenmektedir. Teknolojinin gelişmesi ile artan endüstriyel faaliyetler, kompleks yapıları atık suların çevre ve insan sağlığına zarar vermeyecek şekilde arıtılmasını zorunlu hale gelmiş, bu durum sürdürülebilir, düşük maliyetli ve biyoyumlu arıtma teknolojilerine olan ihtiyacı ortaya çıkarmıştır. Literatürde membran filtrasyonu da dahil olmak üzere birçok yöntem denenmiş olsa da son yıllarda doğal ve ticari polimerlerden üretilen kompozit membranlar, düşük üretim maliyeti ve yüksek arıtma verimliliği nedeniyle dikkat çekmektedir.

Su kaynaklarının kirlenmesi, günümüzde küresel ölçekte çevresel ve halk sağlığı sorunlarının başında gelmektedir. Özellikle endüstriyel atık suların içeriğindeki ağır metaller ve toksik bileşikler, geleneksel arıtma yöntemleriyle tam anlamıyla giderilememektedir (Fu ve Wang, 2011). Bununla birlikte, mevcut arıtma teknolojileri çoğu zaman yüksek enerji ve işletme maliyetleri gerektirmekte, bu da sürdürülebilirlik açısından ciddi engeller oluşturmaktadır (Shon vd., 2006). Bu nedenle, çevre dostu, ekonomik ve etkili arıtma tekniklerinin geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Polimerik membran teknolojileri, son yıllarda atık suyun geri kazanımı ve ağır metal giderimi gibi uygulamalarda umut verici alternatif bir yenilik olarak öne çıkmaktadır (Yang vd., 2019). Özellikle biyoyumlu polimerler kullanılarak geliştirilen kompozit membranlar hem düşük üretim maliyetleri hem de yüksek seçicilik ve geçirgenlik özellikleri ile dikkat çekmektedir (Ali vd., 2021). Ayrıca, bu tür membranlar sayesinde atık su arıtımında çevreye zarar vermeden yeniden kullanılabilir su elde edilmesi mümkün hale gelmektedir. Son yıllarda geliştirilen polimerik tabanlı membranlar arasında PES (polieter sülfon), PVDF (poliviniliden florür), PEG (polietilen glikol), PVA (polivinil alkol), PLA (polilaktik asit) ve aljinat gibi bileşenler kullanılmaktadır.

Polimerin tanımını yaparken genel olarak şunlardan bahsedilebilir. Çok sayıda küçük birimin (monomer) kimyasal bağlarla birbirine bağlanarak oluşturduğu büyük moleküllerdir. Polimerler, doğada veya endüstriyel süreçlerde sentezlenebilir ve çok çeşitli fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklere sahip olabilirler. Polimerler, farklı monomer birimlerinin birleşiminden oluşur ve bu birimler genellikle tekrarlayan yapılar gösterir. Bu yapı, polimerlere esneklik, dayanıklılık ve farklı çevre koşullarına direnç gibi özellikler kazandırır (Becerra vd., 2018).

Polimerler, genellikle kullanım alanları ve yapılarına göre farklı alt dallara ayrılabilirler. Bu alt dallar şunlardır:

**Termoplastikler:** Termoplastikler, ısıtıldığında eriyebilen ve soğutulduğunda katılaştıran polimerlerdir. Bu özellik, termoplastiklerin yeniden şekillendirilmesini sağlar. Plastik sanayisinde yaygın olarak kullanılırlar ve örnekler arasında polietilen (PE), polipropilen (PP) ve polivinil klorür (PVC) bulunur (Zhang vd., 2017).

**Termosetler:** Termosetler, ısıtıldığında bir kez sertleşen ve sonrasında tekrar ısıtıldıklarında erimeyen polimerlerdir. Bu tür polimerler, yüksek sıcaklıklara dayanıklı ve sert özelliklere sahiptir. Epoksi reçineleri, fenolik reçineler ve bakelit termosetlere örnek olarak verilebilir.

**Elastomerler:** Elastomerler, yüksek esneklik ve geniş bir gerilme aralığına sahip polimerlerdir. Bu özellikleri, onları lastik ve sünger gibi ürünler için ideal hale getirir. Kauçuk ve silikon gibi maddeler elastomer polimerlerine örnek teşkil eder (Lee vd., 2018).

**Biyopolimerler:** Biyopolimerler, doğada bulunan canlı organizmalardan elde edilen polimerlerdir. Genellikle biyolojik olarak parçalanabilir ve çevre dostu özellikleriyle bilinirler. Örnek olarak, nişasta, selüloz ve proteinler biyopolimerler arasında yer alır (Wang ve Chen, 2021).

**Kompozit Polimerler:** Kompozit polimerler, farklı malzemelerin birleşimiyle üretilen, genellikle polimer ve takviye malzemelerinin birleştirildiği malzemelerdir. Bu tür polimerler, genellikle yüksek dayanıklılık ve güç gerektiren uygulamalarda kullanılır. Örneğin, cam elyaf takviye edilmiş polimerler (GFPR) ve karbon elyaf takviye edilmiş polimerler (CFRP) kompozit polimerlere örnektir (Stevens vd., 2019).

### Polimerik Membranların Endüstriyel Uygulamaları

Polimerler, geniş bir kullanım alanına sahip malzemelerdir. Gıda ambalajlarından otomotiv endüstrisine kadar birçok alanda kullanılmakta ve tercih edilmektedirler. Özellikle atık su arıtımı ve su filtreleme sistemlerinde polimer temelli membranların kullanımı oldukça yaygındır. Polimerik membranlar, su arıtma ve ağır metal giderimi gibi uygulamalarda, ekonomik ve verimli çözümler sunmaktadır (Zhao vd., 2020).

Membranlar, bir karışımdaki bileşenleri fiziksel olarak ayırmak için kullanılan yarı geçirgen yapılar olup özellikle sıvıların arıtılmasında yaygın olarak tercih edilmektedir. Membran teknolojisi, özellikle atık su arıtımı, gıda işleme, ilaç üretimi ve çevre mühendisliği gibi birçok endüstriyel alanda önemli yer tutmaktadır (Judd, 2006).

Polimerik membranlarda dikkat edilmesi gereken en önemli parametreler; gözeneklerin boyutu/dağılımı/kıvrımları, membranın yüzeyinin pürüzlülüğü/kalınlığı ve molekül ağırlığı sınıridir. pH, basınç, sıcaklık değişkenleri ve bazı maddelere toleransı kullanım alanlarını sınırlandırmaktadır.

Membranlar temel olarak iki ana gruba ayrılmaktadır; **doğal membranlar** ve **sentetik membranlar**. Doğal membranlar biyolojik kaynaklıdır ve genellikle biyoyumlu uygulamalarda tercih edilirken, sentetik membranlar polimerik veya inorganik malzemelerden üretilerek daha geniş endüstriyel kullanım alanına sahiptir (Zhao vd., 2020).

Kullanım amaçlarına ve geçirgenlik seviyelerine göre membranlar ayrıca şu türlerde sınıflandırılmaktadır:

**Mikrofiltrasyon (MF):** 0.1–10 mikron aralığında gözenek büyüklüğüne sahiptir ve genellikle askıda katı maddelerin gideriminde kullanılır (Wu vd., 2021).

**Ultrafiltrasyon (UF):** 0.01–0.1 mikron aralığında gözenek büyüklüğüne sahiptir; proteinler, bakteriler gibi daha küçük parçacıkların tutulmasında etkilidir (Judd, 2006).

**Nanofiltrasyon (NF):** Daha küçük moleküllerin ayrıştırılmasında, özellikle divalent iyonların giderilmesinde kullanılır. Gözenek boyutları 0.001 mikron civarındadır (Zhao vd., 2020).

**Ters Osmoz (RO):** En küçük gözenek çapına sahip membran türüdür (yaklaşık 0.0001 mikron). Tuz, ağır metal iyonları ve mikroorganizmaların sudan ayrıştırılmasında kullanılır (Wu vd., 2021).

Membranların bu farklı türleri, uygulama alanına göre seçilmekte ve arıtma sistemlerinde verimliliği maksimize etmek amacıyla bazen kombine olarak da kullanılabilir. Özellikle polimer bazlı membranlar, dayanıklılık, üretim kolaylığı ve düşük maliyet avantajlarıyla dikkat çekmektedir (Zhao vd., 2020).

Sodyum aljinat, esasında kahverengi deniz yosunlarından (örneğin *Laminaria*, *Ascophyllum* türleri) elde edilen doğal ve suda çözünür bir polisakkarittir, bunun yanında biyoyumlu, biyobozunur ve toksik olmayan özellikleri nedeniyle çeşitli endüstriyel ve biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Draget vd., 2006). Aljinik asidin sodyum tuzu formu olan bu bileşik, özellikle hidrojel üretiminde çapraz bağlayıcı ajanlarla tepkimeye girerek jel matrisi oluşturma yeteneği ile dikkat çekmektedir. Ayrıca sodyum aljinat, çapraz bağlayıcı ajanlarla (örneğin kalsiyum iyonları) jel oluşturabilmesi sayesinde kontrollü geçirgenlik özellikleri sunar ve membranların yapısal stabilitesini artırır (Lee ve Mooney, 2012). Bu özellikler, özellikle atık su arıtımında seçici ve yüksek verimli filtreleme için büyük avantaj sağlamaktadır.

Polimerik membran teknolojilerinde sodyum aljinatın kullanımı hem çevre dostu hem de sürdürülebilir membran üretimine olanak tanınması açısından önemlidir. Bu doğal biyopolimer, genellikle poliviniliden florür (PVDF) ve polieter sülfon (PES) gibi sentetik polimerlerle karıştırılarak kompozit membranlarda destekleyici veya işlevsel bileşen olarak yer almaktadır (Wang vd., 2021). Bu tür kompozit yapılar, ağır metal iyonlarının sudan uzaklaştırılması, boyar madde giderimi ve toksik organik bileşiklerin filtrasyonu gibi uygulamalarda yüksek performans sergileyebilmektedir (Wu vd., 2021).

### **Polivinilidenflorür (PVDF)**

Poliviniliden florür (PVDF), yüksek kimyasal direnç, termal stabilite ve mekanik dayanıklılık özellikleriyle öne çıkan yarı kristalin bir floropolimerdir (Feng vd., 2018). Bu özellikleri sayesinde PVDF, özellikle membran teknolojilerinde tercih edilen polimerlerden biri haline gelmiştir. Membran uygulamalarında yaygın olarak kullanılmasının temel nedenlerinden biri, su arıtma işlemlerinde asidik ve bazik ortamlara karşı gösterdiği dayanıklılıktır (Sukitpaneent ve Chung, 2012).

PVDF'nin oldukça hidrofobik bir yapıya sahip olması, suyun ve çözülmüş maddelerin geçişini kontrol etmede önemli avantajlar sağlamaktadır. Ancak bu özelliği bazı durumlarda membran yüzeyinde kirlenmeye neden olabileceğinden, PVDF sıklıkla hidrofilik maddelerle modifiye edilerek performansı artırılmaktadır (Bai vd., 2019). Bu tür yüzey modifikasyonları, PVDF membranların ağır

metal iyonları, boyar maddeler ve organik kirleticilerin uzaklaştırılmasındaki etkinliğini önemli ölçüde artırmaktadır.

Literatürde PVDF bazlı membranların, PES (Polieter sülfon) ve biyopolimerler (örneğin sodyum aljinat) ile kullanılmasıyla elde edilen kompozit yapıların hem mekanik dayanım hem de seçicilik açısından geliştirilmiş performans sunduğu bildirilmektedir (Wu vd., 2021). Ayrıca, PVDF'nin ısıyla şekillendirilebilir olması ve çeşitli katkı maddeleri ile kolay işlenebilmesi, onu endüstriyel ölçekte membran üretimi için uygun bir malzeme haline getirmektedir.

Membranların oluşturulmasında PVDF kullanımının avantajları pek fazladır. PVDF (Poliviniliden Florür), olağanüstü kimyasal direnci üstün mukavemet ve stabilite ile birleştiren, bir floropolimerdir. PVDF, en sert kimyasallara bile 150°C'ye kadar sıcaklıklarda bile benzersiz bir direnç gösterirken, tipik mukavemet ve sertlik değerlerinin üç katına kadar daha fazlasını gösterir. PVDF, güneş ışığına ve diğer ultraviyole radyasyon kaynaklarına karşı karardır. Ayrıca hem frekanslarda hem de sıcaklıklarda geniş bir aralıkta sabit kalan mükemmel tokluk ve elektriksel özellikler sunduğundan, PVDF güç aktarımı için kullanılan bileşenlerde de sıklıkla kullanılır. PVDF levhalar ve çubuklar kolayca işlenir. PVDF genellikle saflık, güç ve çözücülere, asitlere, bazlara, ısıya ve düşük duman oluşumuna karşı direnç gerektiren uygulamalarda kullanılır.

Bu avantajlarına ek olarak, PVDF (polyviniliden florür) tamamen saf bir malzemedir. Diğer plastiklerle karşılaştırıldığında en önemli farklılığı, UV stabilizatör, yumuşatıcı, yağlayıcı madde veya alev geciktirici katkı maddeleri ihtiva etmemesidir. Bu özelliği nedeniyle ultra saf su sistemlerinde ve yarı iletken sanayide temiz kimyasalların taşınmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Kimyasal olarak inert bir malzeme olduğundan maddelerle tepkimeye girmesi hemen hemen imkansızdır. Literatürde polimetilmetakrilat, polietilmetakrilat gibi ticari polimerler kullanılarak üretilen membranlar yoğunlukta olduğu için PVDF içeren ve daha nadir bulunan polimer türeviden membranların üretimine gerek duyulmaktadır.

### **Polietersülfon (PES)**

Polieter sülfon (PES), aromatik yapıdaki termoplastik bir polimer olup yüksek sıcaklıklarda ve agresif kimyasallara karşı gösterdiği direnç ile özellikle su ve atık su arıtımı gibi zorlu koşullarda yaygın olarak tercih edilmektedir (Pereira vd., 2021). Yüksek ısı kararlılığına ve mükemmel mekanik özelliklerine rağmen PES, aynı zamanda iyi bir film oluşturma kapasitesine sahiptir ve bu da onu membran üretimi için ideal kılmaktadır (Li vd., 2018).

PES tabanlı membranlar, özellikle mikrofiltrasyon ve ultrafiltrasyon uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu membranlar, yüksek gözeneklilik ve iyi hidrofobik/hidrofilik denge gibi özellikler sunarak suyun içindeki partikülleri ve çözünmüş maddeleri etkin bir şekilde uzaklaştırabilir. Ancak PES, doğal olarak hafif hidrofobik bir polimer olduğundan membran yüzeyinde kirlenmeye neden olabilecek organik madde birikimi (fouling) riski bulundurmaktadır. Bu nedenle literatürde, PES'in sodyum aljinat, PEG, PVP veya nanoparçacıklarla modifiye edilerek membranların hidrofilik özelliğinin artırıldığı ve bu sayede performanslarının optimize edildiği bildirilmektedir (Lalia vd., 2013). PES, PVDF gibi diğer polimerlerle birleştirilerek kompozit membranlar oluşturulduğunda hem fiziksel dayanıklılığı artmakta hem de ağır metaller gibi spesifik kirleticilere karşı seçiciliği iyileştirilmektedir. Bu tür kompozit yapıların, sürdürülebilir ve etkili atık su arıtım teknolojilerinde kullanılmaya potansiyeli oldukça yüksektir (Zhao vd., 2020).

## Gümüş Nanopartikül (AgNP) Katkılı Membranlar

Gümüş nanoparçacıklar (AgNP), 1–100 nm boyut aralığında yer alan ve yüksek yüzey alanına sahip, antimikrobiyal ve oksidatif özellikleriyle öne çıkan metalik nanoparçacıklardır. Özellikle su ve atık su arıtımında bakterisidal etkileri ve kirleticilere karşı yüksek adsorpsiyon kapasiteleri nedeniyle yaygın şekilde kullanılmaktadır (Rai vd., 2009). AgNP'lerin yüzey özellikleri, kirletici maddelerle etkileşimlerini artırmakta ve bu sayede zararlı mikroorganizmaların giderilmesinde önemli katkı sağlamaktadır (Klaine vd., 2008).

Literatürde, AgNP katkılı membranların özellikle mikrobiyal kontaminasyonun önlenmesi ve membran tıkanmasının azaltılmasında etkili olduğu bildirilmektedir (Zhao vd., 2016). Ayrıca, bu nanoparçacıkların, membranların hidrofobik yüzeylerini daha hidrofilik hale getirerek su geçirgenliğini artırdığı ve ağır metallerle iyonik etkileşim kurarak tutma kapasitesini iyileştirdiği belirtilmektedir (Liu vd., 2015). Bu özellikleri nedeniyle AgNP katkılı polimerik membranlar, sadece mikrobiyal değil, aynı zamanda kimyasal kirleticilerin uzaklaştırılmasında da umut vadeden malzemeler olarak değerlendirilmektedir.

Membran teknolojileri, atık suların ağır metallerin uzaklaştırılmasında yaygın olarak kullanılan etkili yöntemler arasında yer almaktadır. Polimerik membranların performansı, içerisine katılan nanomalzemeler ile geliştirilebilmektedir. Bu bağlamda birçok çalışmada, farklı nanoparçacıklar kullanılarak membran özellikleri optimize edilmiştir.

Madenli ve arkadaşları (2023), çinko oksit nanoparçacıkları (nZnO) içeren polietersülfon (PES) membranlar kullanarak ultrafiltrasyon işlemi gerçekleştirmiş ve nZnO katkısının membranın hidrofilitliğini, porozitesini, akı değerini, verimini ve tıkanmaya karşı direncini arttırdığını rapor etmişlerdir. Karakterizasyon için temas açısı ölçüm cihazı, FT-IR ve SEM analizleri kullanılmıştır (Madenli vd., 2023). Benzer şekilde, Bayyiyah ve arkadaşları (2023), PVDF-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozit membranları kullanarak Pb<sup>2+</sup> iyonlarının %97,75 oranında giderildiğini ve membran performansının önemli ölçüde iyileştiğini bildirmiştir (Bayyiyah vd., 2023).

Yıldız ve Manzak (2022), polivinil klorür (PVC) içeren membranların morfolojik dayanıklılığını incelemiş, asidik ve bazik ortamlara karşı membranların dayanım gösterdiğini ve uzun süreli kullanım için uygun olduklarını saptamışlardır (Yıldız ve Manzak, 2022). Çelik Madenli ve arkadaşları (2017) ise PES membranların koagülasyon ortamındaki tuz konsantrasyonlarına göre gözenek yapılarının değiştiğini göstermiştir. Özellikle %5 NaCl çözeltisi kullanıldığında membran gözenek çaplarında küçülme gözlemlenmiştir (Çelik Madenli vd., 2017).

Kaya ve Onaç (2016), karbon bazlı nanomalzemeler içeren polimerik membranların Cr(VI) iyonlarına karşı %97,69 oranında seçici ve etkili olduğunu belirtmiş, membran karakterizasyonunda FT-IR, AFM ve temas açısı ölçüm cihazı kullanılmıştır (Kaya ve Onaç, 2016). Kavitha ve Palanivelu (2012) ise di(2-etilheksil) fosforik asit içeren membranlarla Cu(II) iyonlarının başarılı şekilde ayrıştırıldığını ve membranların tekrar kullanılabilir olduğunu ortaya koymuştur (Kavitha ve Palanivelu, 2012).

Son yıllarda, gümüş nanoparçacıklar (AgNP) içeren membranlara olan ilgi artmaktadır. AgNP'lerin yüksek antimikrobiyal özelliklerinin yanı sıra membran yüzeyinde hidrofilitliği arttırdığı, kirlenmeye (fouling) karşı direnci iyileştirdiği ve ağır metallerin tutulmasında etkili olduğu



bildirilmektedir (Zhou vd., 2021). Örneğin, AgNP katkılı PVDF membranların, su filtrasyon uygulamalarında hem yüksek akı değeri hem de ağır metal iyonlarına karşı daha yüksek uzaklaştırma oranları sergilediği belirtilmiştir (Liu vd., 2020). Literatürde PES, PVDF gibi polimerik bileşiklerin ZnO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gibi nanoparçacıklarla modifiye edilerek ağır metal giderimi üzerine yapılan pek çok çalışma bulunmasına rağmen, AgNP katkılı polimerik membranlar ile ağır metallerin seçici olarak giderimi üzerine çalışmalar sınırlıdır. Bu nedenle, PES ve PVDF gibi polimerik membranların AgNP ile modifikasyonu, membran performansını artırarak hem ağır metal giderimi açısından hem de membran yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi açısından önemli bir katkı sağlayabilir.

## KAYNAKÇA

- Ali, I., Asim, M., & Khan, T. A. (2021). Low-cost adsorbents for the removal of organic pollutants from wastewater. *Journal of Environmental Management*, 113, 170–183. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.08.028>
- Almeida G. S., Cattrall, R. W., Kolev, S. D. (2017). Polymer inclusion membranes (PIMs) in chemical analysis-A review. *Analytica Chimica Acta*, 987, 1-14.
- Bahiyyah, W., Hidayah, M., & Syahputra, K. Y. (2023). Performance evaluation of PVDF-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> membranes for Pb<sup>2+</sup> ion removal from aqueous solutions. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 12(2), 182–191.
- Bessarabov D. (1999). Membrane gas-separation technology in the petrochemical industry. *Membrane Technology*, 9–13.
- Bai, H., Zhang, L., & Liu, Y. (2019). Surface modification of PVDF membranes for wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*, 570–571, 102–120. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.10.050>
- Becerra, D., Martinez, J., & Liu, Y. (2018). Polymer materials and their applications in water treatment. *Environmental Science & Technology*, 42(3), 345–356.
- Çelik Madenli, E., Çakmakçı, Ö., Aktaş, K., & Aygör, U. (2017). Effects of salt concentration in coagulation bath on pore structure of PES membranes. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7(1), 109–113.
- Draget, K. I., Smidsrød, O., & Skjåk-Bræk, G. (2006). Alginates: Biosynthesis and properties. In A. Steinbüchel (Ed.), *Biopolymers Online* (Vol. 6, pp. 1–30). Wiley-VCH. <https://doi.org/10.1002/3527600035.bpol6005>
- Elcik, H., Çelik, S. Ö., Çakmakçı, M., Ünal, E. ve Kaya, B. (2016). Farklı özelliklere sahip polimerik membranlarla evsel atıksuların arıtılması. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5, 2, 104-116.
- Feng, C., Khulbe, K. C., Matsuura, T., & Wei, Q. (2018). *Polymeric membranes for wastewater treatment*. CRC Press.
- Fu, F., & Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 407–418. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>
- Judd, S. (2006). *The MBR Book: Principles and applications of membrane bioreactors in water and wastewater treatment*. Elsevier.
- Kaya, A., Onac, C., Alpoğuz, H. K., Yılmaz, A., & Atar, N. (2016). Removal of Cr(VI) from wastewater using polymer inclusion membranes containing carbon-based nanomaterials: Characterization and performance. *Chemical Engineering Journal*, 283, 141–149.

- Kavitha, T., & Palanivelu, K. (2012). Transport of Cu(II) ions using polymer inclusion membranes composed of D2EHPA, CTA and DOP. *Desalination*, 284, 54–59. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.08.043>
- Klaine, S. J., Alvarez, P. J., Batley, G. E., Fernandes, T. F., Handy, R. D., Lyon, D. Y., ... & Lead, J. R. (2008). Nanomaterials in the environment: Behavior, fate, bioavailability, and effects. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 27(9), 1825–1851. <https://doi.org/10.1897/08-090.1>
- Lalia, B. S., Kochkodan, V., Hashaikeh, R., & Hilal, N. (2013). A review on membrane fabrication: Structure, properties and performance relationship. *Desalination*, 326, 77–95. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.06.016>
- Lee, C., Park, H., & Kim, D. (2018). Elastomers: Properties and applications. *International Journal of Rubber Science*, 44(2), 200–215.
- Lee, K. Y., & Mooney, D. J. (2012). Alginate: Properties and biomedical applications. *Progress in Polymer Science*, 37(1), 106–126. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.06.003>
- Li, X., Wang, X., & Liu, C. (2018). Modification of PES membranes for enhanced performance in water treatment: A review. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 4(11), 1611–1627.
- Liu, Y., He, L., Mustapha, A., & Lin, M. (2015). Antibacterial properties of silver nanoparticles synthesized using tea extracts. *Journal of Food Science*, 74(7), M302–M307. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01307.x>
- Liu, Y., Wang, R., & Chung, T.-S. (2020). Silver nanoparticle incorporated membranes for enhanced anti-biofouling and heavy metal ion removal performance. *Journal of Membrane Science*, 598, 117687. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117687>
- Madenli, E. Ç., Şen, F., & Erçin, A. (2023). Investigation of ultrafiltration performance of PES membranes modified with ZnO nanoparticles. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 35(2), 637–645.
- Pereira, N., St John, A., Cattrall, R. W., Perera, J. M., Kolev, S. D. (2009). Influence of the composition of polymer inclusion membranes on their homogeneity and flexibility. *Desalination*, 236, 1-3, 327-333.
- Pereira, V. J., Martins, Â., & Ferreira, E. C. (2021). Polyethersulfone membranes: A review on fabrication and applications. *Membranes*, 11(8), 598. <https://doi.org/10.3390/membranes11080598>
- Rai, M., Yadav, A., & Gade, A. (2009). Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobials. *Biotechnology Advances*, 27(1), 76–83. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.09.002>
- Shon, H. K., Vigneswaran, S., & Snyder, S. A. (2006). Effluent organic matter (EfOM) in wastewater: Constituents, effects, and treatment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 36(4), 327–374. <https://doi.org/10.1080/10643380600580011>

- Stevens, E., Rogers, T., & Lin, M. (2019). Composite polymers: Properties and applications in industrial materials. *Materials Science and Engineering*, 36(7), 877–889.
- Sukitpeneenit, P., & Chung, T.-S. (2012). High performance PVDF hollow fiber membranes with small wall thickness for ultrafiltration. *Journal of Membrane Science*, 409–410, 61–71. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.02.044>
- Üçel, İ. S., & Demirel, E. (2022). Modification of PVDF membranes using dopamine/zinc oxide for lead removal from aqueous media. *Open Journal of Nano*, 7(2), 53-73.
- Wang, M., & Chen, Y. (2021). Biopolymers in wastewater treatment: A review. *Journal of Environmental Management*, 80(2), 195–203.
- Wang, Z., Xing, W., & He, Q. (2021). Sodium alginate-based hybrid membranes for wastewater treatment: A review. *Carbohydrate Polymers*, 254, 117278. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117278>
- Wu, Y., Li, Y., Zhang, L., & Liu, H. (2021). Biopolymer-based composite membranes for wastewater treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 402, 123456.
- Yang, Y., Li, W., Wang, Z., & Wang, J. (2019). Preparation of bio-based polymer membranes and their application in wastewater treatment. *Membranes*, 9(4), 45. <https://doi.org/10.3390/membranes9040045>
- Yıldız, Y., & Manzak, A. (2022). Polivinil Klorür İçeren Membranın Karakterizasyonunun ve Ekstraksiyon Veriminin Zaman İçerisinde Değişimi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(2), 897–907. <https://doi.org/10.47495/okufbed.1055135>
- Zhang, Y., Liu, Q., & Tan, W. (2017). The study of thermoplastic materials for water purification. *Polymer Engineering and Science*, 57(5), 540–550.
- Zhao, X., Li, Y., Ge, X., & Zhang, Y. (2016). Enhanced antifouling performance of PES ultrafiltration membranes by incorporating silver nanoparticle-decorated graphene oxide. *RSC Advances*, 6(23), 18900–18910. <https://doi.org/10.1039/C5RA26677A>
- Zhao, X., Ma, X., Li, Y., & Liu, Y. (2020). Review of membrane materials for heavy metal removal from wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 402, 126271. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126271>
- Zhou, Y., Zhang, Y., & Zhang, H. (2021). Silver nanoparticle-enhanced polymer membranes: Antifouling and selective heavy metal removal properties. *Separation and Purification Technology*, 254, 117599. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117599>

# Bölüm 11

## FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELER: TERMODİNAMİK TEMELLER, SINIFLANDIRMA VE MÜHENDİSLİK UYGULAMALARI

*Büşra ARSLAN<sup>1</sup>, Levent Cenk KUMRUOĞLU<sup>2</sup>*

---

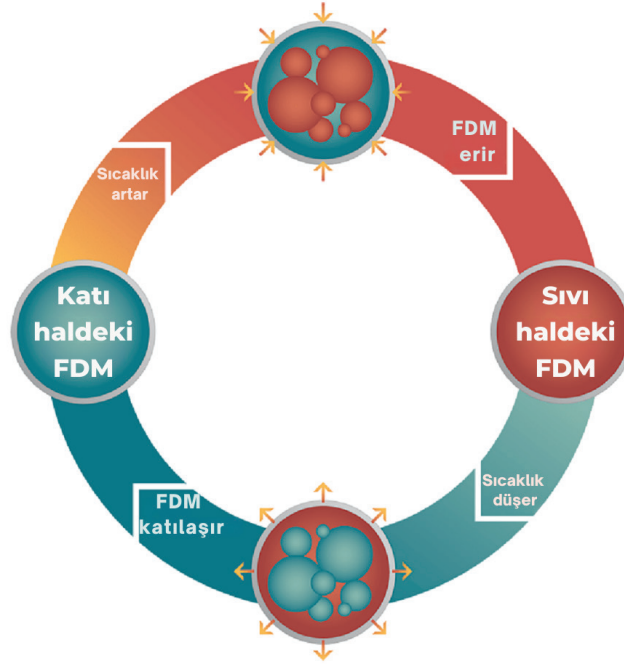
1 Dr. Öğr. Üyesi, Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye, ORCID: 0000-0002-1084-013X, busraozdemir@gazi.edu.tr

2 Prof. Dr., İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Hatay, Türkiye, ORCID: 0000-0001-6420-3761, cenk.kumruoglu@iste.edu.tr

## Giriş

Artan enerji talebi, fosil yakıtların çevresel etkileri ve yenilenebilir enerji kaynaklarının süreksiz yapısı, enerji depolama teknolojilerini modern enerji sistemlerinin vazgeçilmez bir bileşeni hâline getirmiştir. Özellikle ısı enerjisinin etkin şekilde depolanması ve yönetilmesi, başta bina teknolojileri ve yenilenebilir enerji sistemleri olmak üzere birçok mühendislik uygulamasında kritik bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, gizli ısı depolama prensibi ile çalışan faz değiştiren malzemeler (FDM'ler), yüksek enerji yoğunlukları ve sıcaklık düzenleme kabiliyetleri sayesinde son yıllarda yoğun ilgi görmektedir.

Faz değiştiren malzemeler, belirli bir sıcaklık aralığında faz değişimi sırasında büyük miktarda ısı enerjisini depolayabilen ve bu enerjiyi daha sonra serbest bırakabilen önemli gizli ısı depolama malzemeleridir. Bu özelliği sayesinde ısı depolama, sıcaklık düzenleme ve enerji verimliliği uygulamalarında önemli bir rol oynarlar. Katı-sıvı dönüşümü esnasında sıcaklık sabit kalır; dolayısıyla enerji depolama ve geri verme süreçleri yüksek verimlilikle gerçekleşir. Şekil 1, tipik bir FDM'nin çalışma prensibini göstermektedir. Gizli ısı depolamanın en büyük avantajlarından biri, birim kütle veya hacim başına çok yüksek enerji depolama kapasitesine sahip olmasıdır. Bu sayede FDM'ler, geleneksel malzemelerden 5 ila 14 kat daha fazla termal enerjiyi depolayıp bırakabilmekte ve diğer ısı depolama teknolojilerine göre daha verimli bir performans sunmaktadır [Esapour vd., 2016].

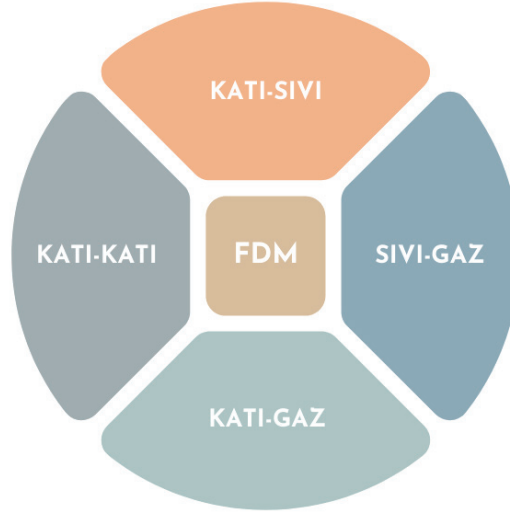


Şekil 1. Tipik bir FDM'nin çalışma prensibi [Zhang vd., 2023]

### 1. Faz Değişimi Mekanizması ve Termodinamik Temeller

FDM'lerin özelliklerini keşfetmek ve belirli kriterlere göre sınıflandırmak, bu malzemelerin etkili kullanımını sağlamak açısından büyük önem taşımaktadır. Doğada birçok madde farklı fazlara geçiş yapabilir de, yalnızca belirli özelliklere sahip olanlar FDM olarak değerlendirilebilir. FDM'lerin doğru bir şekilde kategorize edilmesi, belirli sistemler için en uygun malzemenin seçilmesini

kolaylaştırır. FDM'ler, termal enerjiyi dört temel faz dönüşümü yöntemi ile depolayabilir: Bunlar katı-katı, katı-sıvı, sıvı-gaz ve katı-gaz geçişleridir (Şekil 2). Bu sınıflandırma, malzemelerin kullanım alanlarına göre seçiminde önemli bir rol oynar [Sharma vd., 2009].



Şekil 2. FDM'nin faz geçişine göre sınıflandırılması [Zhang vd., 2023]

### 1.1. Katı-katı faz değişimi

Katı-katı faz değişimi, iki veya daha fazla katı faz arasında dönüşümün gerçekleştiği bir faz değişimi türüdür. Bu dönüşümler, termodinamik denge koşulları altında veya kinetik süreçlerle meydana gelebilir. Genellikle enerji, malzeme bilimi, metalurji, kristalografi ve fizikokimya alanlarında incelenir [Porter vd., 2009]. Bu faz dönüşümleri, mekanik, termal veya manyetik özelliklerde değişikliklere yol açarak mühendislik uygulamaları açısından büyük önem taşır. Katı-katı faz değişimleri, özellikle termal enerji depolama (TES) sistemlerinde, elektronik soğutma uygulamalarında ve akıllı tekstil malzemelerinde büyük ilgi görmektedir. Ayrıca çeliklerin ısıl işlemleri, manyetik malzemelerde faz değişimleri ve yarı iletken teknolojilerinde önemli rol oynar [Callister ve Rethwisch, 2018].

#### Katı-katı faz değişimi mekanizması

Katı-katı faz değişimi, malzemenin katı faz içinde kristal yapısında değişim gösterdiği ve erime olmadan gerçekleşen bir dönüşümdür [Mehling ve Cabeza, 2008]. Bu tür dönüşümler iki şekilde gerçekleşebilir:

- **Difüzyonlu faz değişimi:** Atomlar veya iyonlar, belirli bir sıcaklıkta uzun menzilli difüzyon hareketi yaparak yeni bir kristal yapı oluşturur. Örneğin, alkil karboksilatlar ve bazı polimer bileşikleri bu mekanizmayı kullanarak katı-katı faz değişimi gösterir [Kenisarin ve Mahkamov, 2007].
- **Difüzyonsuz faz değişimi:** Atomlar belirli bir sıcaklık eşliğinde, toplu hareketle yeni bir düzen oluşturur. Martensitik dönüşümler veya hafızalı alaşımlar (SMA) bu tür bir faz değişimi örneğidir [Özdemir ve Karaman, 2013].

Bu dönüşümlerin temel özelliği, erime olmaksızın termal enerji depolayabilmeleri ve serbest bırakabilmeleridir. Bu özellik, malzemelerin uzun vadeli kullanımını sağlar ve düşük bozunma oranları ile öne çıkmalarına neden olur [Zhang vd., 2010].

### **Katı-katı faz değişiminin avantajları ve dezavantajları**

#### Avantajları:

- Hacim değişimi düşüktür: Katı-sıvı faz değişimi gösteren malzemelerde olduğu gibi genleşme ve büzülme sorunları yaşanmaz [Feldman vd., 1995].
- Mekanik dayanıklılık yüksektir: Malzeme yapısındaki stabilite nedeniyle uzun süreli kullanım için uygundur [Mehling ve Cabeza, 2008].
- Termal döngü ömrü uzundur: Erime ve yeniden kristalleşme süreçlerinde kimyasal bozunma veya faz ayrışması yaşanmaz [Kenisarin ve Mahkamov, 2007].
- Yüksek termal iletkenlik: Katı fazda yüksek ısı transfer katsayısı sayesinde ısının daha hızlı absorbe edilmesini sağlar [Zhang vd., 2010].

#### Dezavantajları:

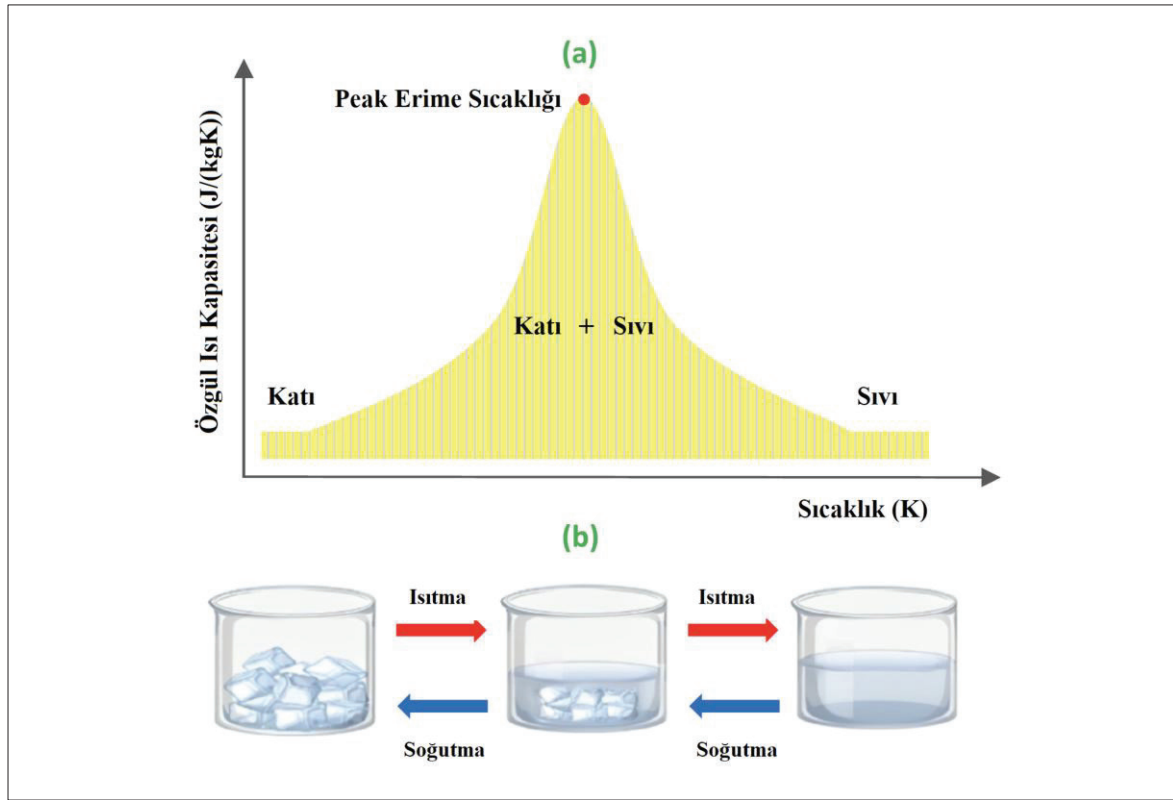
- Faz değişim ısısı düşüktür: Katı-sıvı faz değişimi gösteren FDM'ler ile kıyaslandığında, depolanan enerji miktarı genellikle daha azdır [Mehling ve Cabeza, 2008].
- Hassas sıcaklık kontrolü gerektirir: Faz değişimi belirli bir sıcaklık aralığında gerçekleştiği için, sistemin etkin çalışması için sıcaklık iyi kontrol edilmelidir [Kenisarin ve Mahkamov, 2007].
- Yavaş faz değişimi: Katı hal dönüşümleri genellikle sıvı faz değişimlerine göre daha uzun sürede gerçekleşir, bu da ısı transfer hızını sınırlandırabilir [Zhang vd., 2010].
- Maliyetli üretim süreçleri: Katı-katı faz değişimi gösteren FDM'ler genellikle özel bileşiklerden üretildiği için maliyetleri yüksektir [Özdemir ve Karaman, 2013].

Bu avantajlar ve dezavantajlar göz önüne alındığında, katı-katı FDM'ler, yüksek performanslı bina sistemleri, elektronik cihazların termal yönetimi ve havacılık uygulamaları gibi alanlarda tercih edilmektedir [Özdemir ve Karaman, 2013].

### **1.2. Katı-sıvı faz değişimi**

Katı-sıvı faz değişimi, ısı enerjisinin absorbe edilerek malzemenin erimesi veya donması ile gerçekleşen bir süreçtir. Bu dönüşüm sırasında faz değişimi sıcaklığı sabit kalır ve büyük miktarda enerji depolanabilir [Kenisarin ve Mahkamov, 2007]. Katı-sıvı faz değişimi, FDM'lerin gizli ısı depolama kapasitesini en etkin şekilde kullanmalarını sağlayan mekanizmalardan biridir. Katı-sıvı FDM'ler bina yalıtımı, güneş enerjisi depolama ve elektronik soğutma gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [Mehling ve Cabeza, 2008]. Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak depolanan ısı ve katı-sıvı bir FDM'nin çalışma prensibi Şekil 3'te gösterilmektedir.





Şekil 3. Katı-sıvı FDM'nin çalışma prensibi: a) sıcaklığın fonksiyonu olarak FDM'nin özgül ısı kapasitesi ve b) ısıtma ve soğutma sırasında FDM'nin faz geçişi [Sheikh vd.,2023]

### Katı-sıvı faz değişiminin avantajları ve dezavantajları

#### Avantajları:

- Yüksek enerji depolama kapasitesi: Katı-katı FDM'lerle karşılaştırıldığında, katı-sıvı FDM'ler daha yüksek gizli ısı depolama kapasitesine sahiptir [Kenisarin ve Mahkamov, 2007].
- Sabit faz değişimi sıcaklığı: Erime veya donma sırasında sıcaklık sabit kalır, bu da termal dengeleme açısından büyük bir avantaj sağlar [Mehling ve Cabeza, 2008].
- Geniş malzeme seçeneği: Hem organik hem de inorganik malzemelerle üretilebilir, bu da geniş uygulama yelpazesi sunar [Feldman vd., 1995].

#### Dezavantajları:

- Süper soğutma ve faz ayrışması: Özellikle tuz hidrat bazlı FDM'lerde, faz değişimi sırasında istenmeyen süper soğutma ve bileşen ayrışması sorunları görülebilir [Zhang vd., 2010].
- Düşük termal iletkenlik: Katı-sıvı FDM'lerin çoğunda ısı transfer hızı düşüktür, bu da etkin bir ısı yönetimi için ek malzemeler gerektirebilir [Mehling ve Cabeza, 2008].
- Kaplama ve muhafaza gereksinimi: Sıvı faza geçiş sırasında sızma sorunları yaşanabilir, bu nedenle uygun muhafaza yöntemleri gereklidir [Kenisarin ve Mahkamov, 2007].

Bu avantajlar ve dezavantajlar göz önüne alındığında, katı-sıvı FDM'ler yüksek enerji yoğunluğu gerektiren sistemlerde tercih edilmektedir [Mehling ve Cabeza, 2008].

### 1.3. Sıvı-gaz faz değişimi

Sıvı-gaz faz değişimi, bir maddenin buharlaşması veya yoğunlaşması yoluyla enerji depolayıp serbest bırakmasını içeren bir süreçtir [Mehling ve Cabeza, 2008]. Buharlaşma sırasında madde, çevreden büyük miktarda ısı enerjisi emer ve gaz haline geçer. Yoğunlaşma sürecinde ise madde gaz halinden sıvıya dönüşerek çevreye ısı verir [Zhang vd., 2010]. Bu mekanizma, faz değişimi sırasında yüksek miktarda gizli ısı depolanmasını sağlar. Sıvı-gaz faz değişimi genellikle iki temel süreçle gerçekleşir:

- **Buharlaşma (Evaporasyon):** Bir sıvının yüzeyinden gaz fazına geçişidir. Yüksek sıcaklıklarda ve düşük basınçlarda daha hızlı gerçekleşir [Kenisarin ve Mahkamov, 2007].
- **Kaynama:** Sıvının tüm hacmi boyunca gaz fazına geçtiği süreçtir. Belirli bir kaynama sıcaklığında gerçekleşir ve ortam basıncına bağlıdır [Mehling ve Cabeza, 2008].

Bu faz değişimleri, yüksek enerji yoğunluğu sağlayarak çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır [Zhang vd., 2010].

#### Sıvı-gaz faz değişiminin avantajları ve dezavantajları

##### Avantajları:

- Yüksek enerji depolama kapasitesi: Sıvı-gaz faz değişimi sırasında çok büyük miktarda gizli ısı depolanır, bu da yüksek enerji yoğunluğu gerektiren uygulamalar için idealdir [Kenisarin ve Mahkamov, 2007].
- Hızlı faz değişimi: Gaz fazı, sıvıya göre daha hareketlidir ve faz değişimi hızlı bir şekilde gerçekleşir [Mehling ve Cabeza, 2008].

##### Dezavantajları:

- Basınç ve sıcaklık kontrollü sistem gereksinimi: Sıvı-gaz faz değişimi genellikle yüksek basınç altında gerçekleştiği için özel tasarlanmış kapalı sistemler gerektirir [Mehling ve Cabeza, 2008].
- Yoğunlaşma problemleri: Gaz fazından sıvı faza dönüş sırasında ısının etkin şekilde yayılması gereklidir, aksi takdirde verim kaybı yaşanabilir [Kenisarin ve Mahkamov, 2007].
- Maliyetli depolama sistemleri: Sıvı-gaz FDM'lerin depolanması için özel muhafaza kapları ve ısı değiştiriciler gereklidir, bu da maliyeti artırabilir [Zhang vd., 2010].
- Yüksek hacim değişimi: Faz değişimi esnasında meydana gelen yüksek hacim değişiklikleri sabit basınçlı sistemlerde büyük, karışık ve kullanışsız tasarımlara, sabit hacimli sistemlerde ise yüksek buhar basıncına sebep olmaktadır.

Tüm bunlar göz önüne alındığında, yüksek gizli ısı değerlerine karşılık sıvı-gaz faz değişimi, gaz fazın depolanmasının basınçlı depolama kaplarını gerektirmesi gibi karşılaşılan sorunlar nedeniyle ısı depolamaya uygun değildir [Mehling ve Cabeza, 2008].

### 1.4. Katı-gaz faz değişimi

Katı-gaz faz değişimi, bir maddenin doğrudan katı fazdan gaz fazına geçtiği süblimasyon süreci ile gerçekleşir [Mehling ve Cabeza, 2008]. Bu süreç sırasında madde sıvı faza uğramadan doğrudan gaz haline dönüşür ve yüksek miktarda gizli ısı emer [Kenisarin ve Mahkamov, 2007].

Süblimasyon genellikle düşük basınç ve yüksek sıcaklık koşullarında gerçekleşir. Ayrıca, belirli malzemelerde atmosfer basıncında da gözlemlenebilir. Kuru buz (katı karbondioksit) ve naftalin, bu

faz değişimi mekanizmasına en yaygın örneklerdir [Zhang vd., 2010]. Katı-gaz faz değişimi, faz değişimi sırasında hacimsel genişlemenin çok büyük olması nedeniyle diğer faz değişim türlerinden farklıdır [Feldman vd., 1995]. Bu faz değişimi sırasında depolanan enerji, katı fazın moleküler bağlarının doğrudan kopmasıyla serbest kalır, bu da sürecin oldukça yüksek enerji gerektirmesine neden olur [Mehling ve Cabeza, 2008].

### **Katı-gaz faz değişiminin avantajları ve dezavantajları**

#### Avantajları:

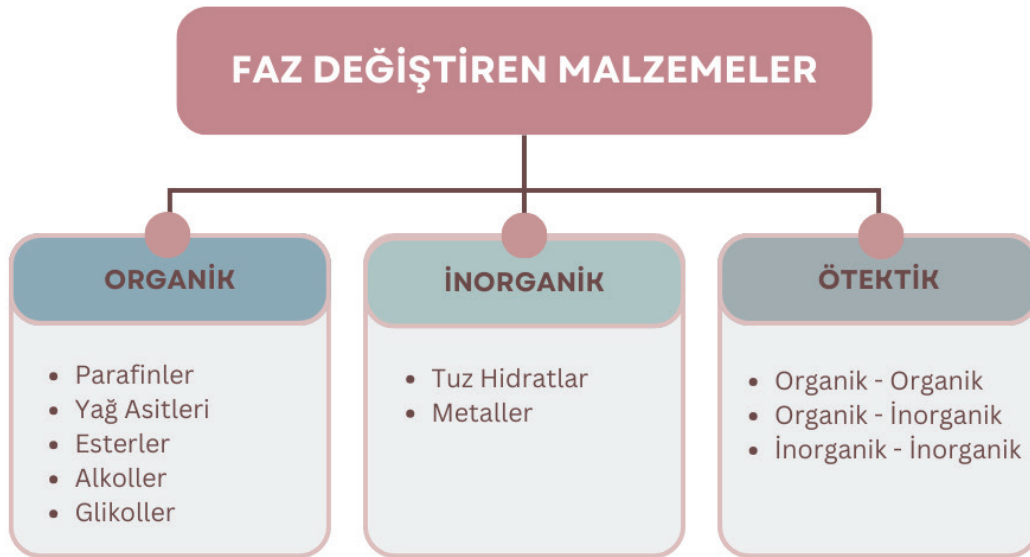
- Çok yüksek enerji depolama kapasitesi: Katı-gaz faz değişimi sırasında büyük miktarda gizli ısı emilir, bu da yüksek enerji yoğunluğu sağlar [Kenisarin ve Mahkamov, 2007].
- Hızlı faz değişimi: Süblimasyon, belirli sıcaklık ve basınç koşullarında çok hızlı gerçekleşebilir, bu da uygulamalar için büyük bir avantaj sunar [Mehling ve Cabeza, 2008].
- Taşınabilir soğutma sistemleri için uygundur: Kuru buz gibi katı-gaz FDM'ler, soğutma gerektiren taşınabilir sistemlerde yaygın olarak kullanılır [Zhang vd., 2010].

#### Dezavantajları:

- Büyük hacim değişimi: Katı fazdan gaz fazına geçiş sırasında hacim genişmesi çok yüksektir, bu da basınç kontrollü ortam gerektirir [Mehling ve Cabeza, 2008].
- Sıcaklık ve basınç kontrollü sistem gereksinimi: Süblimasyon genellikle düşük basınçlı ortamlarda daha verimli gerçekleşir, bu da özel tasarlanmış sistemler gerektirir [Kenisarin ve Mahkamov, 2007].
- Maliyetli depolama ve taşıma: Katı-gaz FDM'ler, özellikle düşük sıcaklıklarda depolanması ve taşınması gereken malzemelerde lojistik açıdan daha maliyetlidir [Zhang vd., 2010].

## **2. Faz Değiştiren Malzemelerin Sınıflandırılması**

Kimyasal yapılarına göre FDM'ler, organik FDM'ler, inorganik FDM'ler ve ötektik FDM'ler olarak gruplandırılabilir (Şekil 4).



Şekil 4. Katı-sıvı faz değiştiren malzemelerin sınıflandırılması [Dincer ve Rosen, 2021]

## 2.1. Organik FDM'ler

Organik malzemeler doğal maddeler olarak bilinir. Bunlar parafin ve parafin olmayan olarak bilinen iki madde olarak tanımlanır ve sınıflandırılır [Huang vd., 2017]. Birçok organik FDM, katı-sıvı faz değişim sıcaklığının 18 °C ile 30 °C arasında veya buna yakın bir aralıkta olması gibi benzersiz bir özelliğe sahiptir. Ayrıca organik FDM'ler kimyasal olarak kararlıdır, toksik değildir, aşındırıcı değildir ve doğada kolayca bulunur. Bu nedenle organik FDM'ler binalarda, tekstillerde vb. termal konfor için en çok kullanılan termal enerji depolama malzemeleridir. Ancak daha yüksek sıcaklıklarda ayrışır, termal iletkenlikleri çok zayıftır ve yanıcıdır [Sharma vd., 2009, Dincer ve Rosen, 2021]. Organik FDM'ler arasında en çok tercih edilen parafindir [Huang vd., 2017].

### Parafinler

Parafin, yüksek füzyon ısısı, sıfır aşırı soğuma özelliği, daha düşük buhar basıncı ve kimyasal olarak inert ve sabit iletkenliğe sahip olması gibi önemli özelliklerden dolayı enerji depolamada yaygın olarak kullanılmaktadır [Parameshwaran vd., 2012]. Bu FDM'ler daha düşük maliyetle ekonomik olarak erişilebilir. Parafine çok sayıda üreticiden etkili bir şekilde ulaşılabilir. Biyolojik olarak güvenli ve ayrıca toksik değildir [Dincer vd., 2002]. Ancak, faz değişimi sırasında yaklaşık %10 oranında hacim genişlemesi, düşük yoğunluk, düşük termal iletkenlik ve yanıcılık gibi çeşitli dezavantajlara sahiptir. Doymuş n-alkan alifatik hidrokarbonları olan parafin, n'nin karbon atomlarının sayısı olduğu bir genel formül ( $\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_n - \text{CH}_3$ ) ile temsil edilir. Omurga zincirindeki karbon atomlarının sayısı ile erime noktaları artar. TES uygulamaları için genellikle n-pentadekandan ( $n = 15$ , erime noktası  $10^\circ\text{C}$ ) n-trikontana ( $n = 30$ , erime noktası  $65^\circ\text{C}$ ) kadar parafin dikkate alınır [Alva vd., 2018]. Birçok araştırmacı, endüstriyel uygulamalarda organik faz değiştiren malzemeler arasında özellikle parafin türlerini incelemek ve analiz etmek amacıyla yeni deneyler geliştirmektedir. Bunun nedeni, parafinlerin bu tür uygulamalarda iyileştirilmiş termal özellikler sunması ve çeşitli avantajlara sahip olmasıdır. Tablo 1, bazı parafinlerin ilgili karbon atomlarına dayalı termofiziksel özelliklerini göstermektedir.

Tablo 1. n-Parafinlerin termofiziksel özellikleri [Alva vd., 2017]

| Parafin                         | Erime Noktası (°C) | Füzyon Gizli Isısı (kJ/kg) | Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> ) |
|---------------------------------|--------------------|----------------------------|-------------------------------|
| n-Pentadekan (C <sub>15</sub> ) | 10                 | 206                        | 770                           |
| n-Hekzadekan (C <sub>16</sub> ) | 20                 | 236                        | 773                           |
| n-Heptadekan (C <sub>17</sub> ) | 22,6               | 214                        | 778                           |
| n-Oktadekan (C <sub>18</sub> )  | 28,4               | 244                        | 776                           |
| n-Nonadekan (C <sub>19</sub> )  | 32                 | 222                        | 785                           |
| n-Eikosan (C <sub>20</sub> )    | 36,6               | 247                        | 788                           |
| n-Henikosan (C <sub>21</sub> )  | 40,2               | 213                        | 791                           |
| n-Dokosan (C <sub>22</sub> )    | 44                 | 249                        | 794                           |
| n-Trikosan (C <sub>23</sub> )   | 47,5               | 234                        | 796                           |
| n-Tetrakosan (C <sub>24</sub> ) | 50,6               | 255                        | 799                           |
| n-Pentakosan (C <sub>25</sub> ) | 53,5               | 238                        | 801                           |
| n-Hekzakosan (C <sub>26</sub> ) | 56,3               | 256                        | 803                           |
| n-Heptakosan (C <sub>27</sub> ) | 58,8               | 235                        | 779                           |
| n-Oktakosan (C <sub>28</sub> )  | 41,2               | 254                        | 806                           |

|                                 |      |     |     |
|---------------------------------|------|-----|-----|
| n-Nonakosan (C <sub>29</sub> )  | 63,4 | 239 | 808 |
| n-Triakontan (C <sub>30</sub> ) | 65,4 | 252 | 775 |

Saf parafin, yüksek saflık gerektirdiği ve maliyetli olduğu için, pratik gizli ısı depolama uygulamalarında genellikle petrol rafinajının bir yan ürünü olan daha ekonomik teknik dereceli (ticari) parafin mumları tercih edilmektedir [Alva vd., 2018]. Teknik dereceli parafin mumları, farklı karbon atom sayılarına sahip parafin bileşiklerinin bir karışımından oluşmaktadır [Alva vd., 2018, Alva vd., 2017]. Tablo 2'de bazı ticari parafinlerin termofiziksel özellikleri özetlenmiştir [Alva vd., 2018].

Tablo 2. Ticari parafinlerin termofiziksel özellikleri [Magendran vd., 2019, İnternet: PCM RT-Line, 2023]

| Parafin                          | Erime Noktası (°C) | Füzyon Gizli Isısı (kJ/kg) | Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> ) |
|----------------------------------|--------------------|----------------------------|-------------------------------|
| C <sub>13</sub> -C <sub>24</sub> | 22-24              | 189                        | 900                           |
| C <sub>16</sub> -C <sub>28</sub> | 42-44              | 189                        | 910                           |
| C <sub>20</sub> -C <sub>33</sub> | 48-50              | 189                        | 912                           |
| C <sub>22</sub> -C <sub>45</sub> | 58-60              | 189                        | 920                           |
| C <sub>23</sub> -C <sub>45</sub> | 62-64              | 189                        | 915                           |
| C <sub>21</sub> -C <sub>50</sub> | 66-68              | 189                        | 930                           |
| RT 18 HC                         | 17-19              | 260                        | 880                           |
| RT 28 HC                         | 27-29              | 250                        | 880                           |
| RT 35 HC                         | 34-36              | 240                        | 880                           |
| RT 44 HC                         | 41-44              | 250                        | 880                           |
| RT 54 HC                         | 53-54              | 200                        | 850                           |
| RT 62 HC                         | 62-63              | 230                        | 850                           |
| RT 70 HC                         | 69-71              | 260                        | 880                           |

### **Yağ asitleri**

Yağ asitleri, (CH<sub>3</sub> (CH<sub>2</sub>)<sub>2n</sub> -COOH) genel formülüne sahiptir ve düşük sıcaklıklarda yüksek termofiziksel özelliklere sahip oldukları için gizli ısı depolama uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yenilenebilir kaynaklardan, özellikle hayvansal ve bitkisel kaynaklardan elde edilmeleri nedeniyle sürdürülebilir FDM sınıfına girmektedirler. Yağ asitleri, parafinlere kıyasla daha yüksek erime ve kaynama noktalarına sahiptir ve doymuş yağ asitleri, faz değişimi sırasında düşük hacim değişiklikleri göstererek daha stabil bir termal performans sergiler. Ayrıca, aşırı soğutma eğilimleri düşük olup, defalarca erime ve donma süreçlerinden geçebilirler. Ancak, teknik sınıf parafinlere kıyasla daha pahalı olmaları, hafif aşındırıcı yapıları ve istenmeyen koku gibi dezavantajları bulunmaktadır. Ayrıca, doğal olarak yanıcı özellik taşımaktadırlar [Sharma vd., 2015].

### **Esterler**

Esterler, organik asitlerin bir hidroksil (-OH) grubunun alkil (-O) grubu ile yer değiştirmesiyle oluşan bileşiklerdir. Yağ asidi esterleri, özellikle katı-sıvı faz geçişlerinde dar bir sıcaklık aralığında değişim göstermeleri nedeniyle enerji depolama sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu malzemeler, düşük aşırı soğutma eğilimi göstermeleri ve ötektik karışımlar oluşturarak yüksek geçiş entalpisi sunmaları

nedeniyle dikkat çekmektedir. Özellikle polimer, kozmetik ve akıllı tekstil endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar ve büyük ölçeklerde kolaylıkla temin edilebilmektedirler [Alva vd., 2017].

### **Alkoller**

Polialkoller olarak da bilinen şeker alkolleri, 90°C ile 200°C arasındaki orta sıcaklık aralığında çalışan faz değiştiren malzemeler olarak kabul edilmektedir. Bu grup, enerji depolama potansiyeli açısından araştırmacıların dikkatini nispeten daha az çekmiş olsa da, yapılan çalışmalar ksilitol, eritritol ve manitol gibi bileşiklerin oldukça yüksek gizli füzyon ısılarına (yaklaşık 300 kJ/kg) sahip olduğunu göstermektedir. Bu değer, diğer birçok organik FDM türüne kıyasla oldukça yüksektir [Pielichowska ve Pielichowski, 2014]. Alkoller, son kırk yıl içinde potansiyel faz değiştiren malzemeler olarak incelenmiş ve termal enerji depolama alanında test edilmiştir.

### **Glikoller**

Glikoller, polietilen glikol (PEG), polioksietilen (POE) veya polietilen oksit (PEO) olarak adlandırılan bileşiklerden oluşmaktadır. PEG, genel olarak  $HO-CH_2-(CH_2-O-CH_2-)_n-CH_2-OH$  formülüne sahip olup, su ve çeşitli organik bileşiklerde çözünme özelliğine sahiptir. PEG türevleri, farklı moleküler ağırlıklara göre sınıflandırılmakta olup, PEG400 ve PEG600 gibi çeşitli ticari derecelerde bulunabilmektedir. Glikoller, kimyasal ve termal olarak kararlı olup, yanıcı olmayan, toksik olmayan ve aşındırıcı etkisi bulunmayan malzemelerdir. Ayrıca, düşük maliyetli oldukları için birçok enerji depolama uygulamasında tercih edilmektedirler [Alva vd., 2017]. Bununla birlikte, diğer organik FDM'ler gibi düşük termal iletkenlik dezavantajına sahiptirler ve bu nedenle ısı transferini iyileştirmek için genellikle metal oksit katkıları ile modifiye edilmektedirler [Zhou vd., 2012].

Bazı organik faz değiştiren malzemelerin sahip olduğu termofiziksel özellikler Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Bazı organik FDM'lerin termofiziksel özellikleri [Raam Dheep ve Sreekumar, 2014]

| Malzeme               | Erime Noktası (°C) | Füzyon Gizli Isısı (kJ/kg) | Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> ) |
|-----------------------|--------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Formik asit           | 7,8                | 247                        | 1226,7                        |
| Asetik asit           | 16,7               | 187                        | 1050                          |
| Gliserin              | 17,9               | 198,7                      | 1260                          |
| D-laktik asit         | 26                 | 184                        | 1249                          |
| Polietilen glikol 600 | 20-25              | 146                        | 1100                          |
| Siyanamid             | 44                 | 209                        | 1080                          |
| Metil ester           | 45                 | 230                        | 851                           |
| Kamfen                | 50                 | 238                        | 842                           |
| Klorasetik asit       | 56                 | 130                        | 1580                          |
| Miristik asit         | 33-57              | 201-213                    | 862                           |
| Balmumu               | 61,8               | 177                        | 950                           |
| Düren                 | 79,3               | 156                        | 838                           |
| Asetamit              | 81                 | 241                        | 1159                          |

|                   |       |       |      |
|-------------------|-------|-------|------|
| Süksinik anhidrit | 119   | 204   | 1104 |
| Benzoik asit      | 121,7 | 142,8 | 1266 |
| Stilben           | 124   | 167   | 1164 |
| Benzamit          | 127,2 | 169,4 | 1341 |
| Alfa glikoz       | 141   | 174   | 1544 |
| Salisilik asit    | 159   | 199   | 1443 |
| O-mannitol        | 166   | 294   | 1489 |
| Hidrokinon        | 172,4 | 258   | 1358 |

## 2.2. İnorganik FDM'ler

İnorganik faz değiştiren malzemeler, özellikle yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Tuz hidratlar ve metaller gibi inorganik bileşenlerden oluşan bu malzemeler, yüksek termal iletkenlik, yüksek entalpi ısısı ve keskin faz geçişleri gibi üstün termofiziksel özellikler sergilemektedir. Ayrıca, organik alternatiflerine kıyasla daha ucuz olmaları ve yanmazlık özellikleri sayesinde güvenlik açısından avantaj sağlamaları nedeniyle mühendislik uygulamalarında önemli bir yere sahiptirler [Sharma vd., 2009]. Bununla birlikte, belirli koşullarda plastiklerle uyumlu oldukları bilinmektedir. Çeşitli inorganik FDM'lerin sahip olduğu termofiziksel özellikler, ilgili literatürde detaylı olarak incelenmiş ve Tablo 4'te verilmiştir.

### Tuz hidratlar

Tuz hidratlar, faz değişim süreçlerinde etkili enerji depolama kapasitesine sahip olmalarına rağmen, bazı teknik sınırlamalara sahiptir. Özellikle, çoğu metal için aşındırıcı özellik göstermeleri nedeniyle, bu malzemelerin kullanımında özel paketleme ve bakım gereksinimleri ortaya çıkmaktadır. Bu durum, uzun vadeli kullanım maliyetlerini artırmaktadır. Ayrıca, tuz hidratların su içeriği yüksek olduğu için mikrokapsülleme yöntemi ile saklanmaları konusunda zorluklar yaşanmaktadır. Bu durum, uzun süreli stabiliteleri üzerinde olumsuz etkilere yol açabilir (Chandel ve Agarwal, 2017).

Tuz hidratların önemli bir başka dezavantajı ise faz ayrışması ve aşırı soğutma eğilimidir. Bu faktörler, uzun süreli enerji depolama uygulamalarında faz değişim verimliliğini düşürebilmektedir [Beaupere vd., 2018]. Bu sorunları hafifletmek amacıyla çekirdekleştirici ve jelleştirici katkı maddeleri kullanılarak faz değişim süreçleri stabilize edilmeye çalışılmaktadır. Örneğin, boraks ve karbon gibi çekirdekleştirici ajanların kullanımı, aşırı soğutma problemini azaltmakta, ancak bu maddeler termal iletkenliği düşürdüğü için genel ısı transfer hızını olumsuz etkileyebilmektedir [Farid vd., 2004]. Bunun sonucunda, tuz hidratların binalar ve seralar gibi doğrudan uygulamalarda kullanımı pratik olmaktan çıkmaktadır.

### Metaller

Metaller ve alaşımlar, yüksek termal iletkenlikleri, mükemmel termal kararlılıkları ve uzun vadeli tekrarlanabilirlikleri nedeniyle yüksek sıcaklık enerji depolama uygulamalarında önemli bir seçenek olarak değerlendirilmektedir [Pielichowska ve Pielichowski, 2014]. Her ne kadar maliyetleri organik ve diğer inorganik FDM'lere kıyasla yüksek olsa da, hacim bazında değerlendirildiğinde, enerji yoğunluğu açısından üstün performans sergilemektedirler [Su vd., 2015]. Metallerin ve alaşımların yüksek yoğunluğu, faz değişimi sırasında minimal hacim değişimi ile sonuçlanarak sistem

stabilitesine katkıda bulunmaktadır. Bununla birlikte, ağırlık bazında düşük ısı depolama kapasitesine sahip olmaları nedeniyle taşınabilir uygulamalar için ideal bir seçenek olmayabilirler [Fernández vd., 2017].

Metalik sistemler, tekrarlanan termal döngüler sonrasında mikro yapılarında bozulmalar yaşayabilmektedir. Özellikle, çökelme, oksidasyon ve ayrışma gibi süreçler, metallerin faz değişim sıcaklıkları ile gizli ısı depolama kapasitelerinde değişimlere neden olabilmektedir. Bu olumsuzlukları en aza indirmek için inert atmosfer gereklidir. Ancak, erime ve katılaşma döngüleri sırasında bazı metallerin inert gazları absorbe edebilmesi, malzemenin termofiziksel özelliklerini olumsuz etkileyebilmektedir [Alva vd., 2018].

Metalik FDM'lerin mühendislik uygulamalarında kullanılabilmesi için metal veya seramik bazlı kaplarda saklanmaları gerekmektedir. Ancak, metallerin termal genleşme katsayılarındaki farklılıklar, bu kapların mekanik bütünlüğünü etkileyerek gerilme ve yırtılma gibi problemlere yol açabilir. Bu nedenle, metaller her ne kadar yüksek sıcaklık enerji depolama malzemeleri olarak büyük bir potansiyele sahip olsalar da, uygulamada karşılaşılabilecek teknik zorluklar nedeniyle FDM olarak yaygın kullanılmamaktadır [Sharma vd., 2009].

Tablo 4. Bazı inorganik FDM'lerin termofiziksel özellikleri [Raam Dheep ve Sreekumar, 2014, Alva vd., 2018]

| Malzeme                           | Erime Noktası (°C) | Füzyon Gizli Isısı (kJ/kg) | Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> ) |
|-----------------------------------|--------------------|----------------------------|-------------------------------|
| NaNO <sub>3</sub>                 | 306                | 182                        | 2260                          |
| RbNO <sub>3</sub>                 | 312                | 31                         | 3685                          |
| NaOH                              | 318                | 165                        | 2100                          |
| KNO <sub>3</sub>                  | 334                | 266                        | 2109                          |
| KOH                               | 380                | 149,7                      | 2044                          |
| CsNO <sub>3</sub>                 | 409                | 71                         | 2500                          |
| AgBr                              | 432                | 48,8                       | 1100                          |
| LiOH                              | 462                | 873                        | 1460                          |
| PbCl <sub>2</sub>                 | 501                | 78,7                       | 5600                          |
| Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | 560                | 145                        | 2113                          |
| LiCl                              | 610                | 441                        | 2070                          |
| FeCl <sub>2</sub>                 | 677                | 337,9                      | 3160                          |
| MgBr <sub>2</sub>                 | 711                | 214                        | 3720                          |
| Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>   | 732                | 509                        | 2110                          |
| CaCl <sub>2</sub>                 | 772                | 253                        | 2150                          |
| CaI <sub>2</sub>                  | 783                | 142                        | 3956                          |
| NaCl                              | 802                | 482                        | 2160                          |
| Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>   | 854                | 276                        | 2533                          |
| KF                                | 858                | 468                        | 2370                          |
| K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>    | 897                | 236                        | 2290                          |
| BaCl <sub>2</sub>                 | 961                | 76                         | 3856                          |
| PbSO <sub>4</sub>                 | 1000               | 133                        | 6200                          |
| K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>    | 1069               | 212                        | 2660                          |
| MgSO <sub>4</sub>                 | 1130               | 122                        | 2660                          |
| MgF <sub>2</sub>                  | 1263               | 938                        | 3150                          |



|                   |      |     |      |
|-------------------|------|-----|------|
| BaF <sub>2</sub>  | 1320 | 119 | 4890 |
| CaF <sub>2</sub>  | 1418 | 391 | 3180 |
| CaSO <sub>4</sub> | 1460 | 203 | 2320 |
| BaSO <sub>4</sub> | 1512 | 188 | 4500 |
| SrSO <sub>4</sub> | 1605 | 196 | 3960 |

### 2.3. Ötektik FDM'ler

Ötektik faz değiştiren malzemeler, iki veya daha fazla bileşenin kombinasyonundan oluşmaktadır. Bu bileşenler, organik-organik, inorganik-inorganik veya organik-inorganik olarak sınıflandırılabilir [Sharma vd., 2009]. Ötektik karışımlar, bileşenlerin saf halleriyle karşılaştırıldığında daha düşük bir sıcaklıkta katılma özelliği göstermektedir [Alva vd., 2017]. Ötektik sistemlerin en önemli avantajlarından biri, ayrışma olmadan erime ve katılma süreçlerini tekrarlayabilmeleridir [Sharma vd., 2015].

Ötektik FDM'ler, keskin erime sıcaklığına ve hacim başına yüksek gizli füzyon ısısına sahip olmalarına rağmen, birim kütle başına düşük füzyon ısısı nedeniyle bazı dezavantajlara sahiptirler. Ayrıca, uzun süreli sentez ve karakterizasyon süreçleri oldukça maliyetli olup, bu malzemelerin kapsamlı test edilmesini zorlaştırmaktadır [Alva vd., 2017]. Ötektik karışımlara ait termofiziksel özelliklerin belirlenmesi için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Çeşitli ötektik karışımların termofiziksel özellikleri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Bazı ötektik FDM'lerin termofiziksel özellikleri [Raam Dheep ve Sreekumar, 2014, Alva vd., 2018]

| Malzeme Bileşimi (wt%)  | Erime Noktası (°C) | Füzyon Gizli Isısı (kJ/kg) |
|---|--------------------|----------------------------|
| LiCl-LiOH (37+63)   | 262                | 485                        |
| NaCl-Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -NaOH (7,8+6,4+85,5)   | 282                | 316                        |
| LiOH/KOH (40+60)  | 314                | 341                        |
| NaCl/KCl/LiCl (33+24+43)  | 346                | 281                        |
| MgCl <sub>2</sub> -NaCl-KCl (63+22.3+14,7)  | 385                | 461                        |
| Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (31+35+34) | 397                | 275                        |
| NaCl-MgCl <sub>2</sub> (50+50)  | 450                | 429                        |
| Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (56+44)                                    | 496                | 368                        |
| KCl-NaCl-CaCl <sub>2</sub> (5+29+66)  | 504                | 279                        |
| KCl-BaCl <sub>2</sub> -CaCl <sub>2</sub> (24+47+29)   | 551                | 219                        |
| LiF-Na <sub>1</sub> -MgF <sub>2</sub> (46+44+10)  | 632                | 858                        |
| LiF-NaF <sub>1</sub> -MgF <sub>2</sub> (33,4+49,9+17,1)   | 650                | 860                        |
| LiF/MgF <sub>2</sub> /KF (64+30+6)  | 710                | 782                        |
| NaF-CaF <sub>2</sub> -MgF <sub>2</sub> (65+23+12)   | 745                | 574                        |
| LiF-MgF <sub>2</sub> (67+33)  | 746                | 947                        |
| LiF/CaF <sub>2</sub> (80,5+19,5)  | 767                | 790                        |
| NaF-MgF <sub>2</sub> (67+33)  | 832                | 616                        |
| NaF-MgF <sub>2</sub> (75+25)  | 832                | 650                        |

Organik, inorganik ve ötektik FDM'lerin birbirlerine kıyasla avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Ayrıca, mevcut eksikliklerin giderilmesine yönelik çeşitli uygulamalar, Tablo 6'da detaylı bir şekilde ele alınmaktadır.

Tablo 6. FDM'lerin avantaj, dezavantaj ve dezavantajlarının üstesinden gelmek için önerilen çözümler [Nishad ve Krupa, 2022].

| FDM türü     | Avantaj  | Dezavantaj   | Önerilen çözüm   |
|--------------|--|--|--|
| Organikler   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kimyasal kararlılık</li> <li>• Korozif etki göstermeme</li> <li>• İhmal edilebilir çok aşırı soğuma ve aşırı soğuma</li> <li>• Düşük buhar basıncı</li> <li>• Isıl kararlılık</li> <li>• Uyumlu ergime</li> <li>• Yüksek bulunurluk</li> <li>• Tekrar kullanılabilme</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Düşük ısı iletkenlik</li> <li>• Yanıcılık</li> <li>• Düşük ve orta sıcaklık uygulamalarına uygunluk</li> <li>• Yüksek hacimsel genleşme</li> <li>• Geçici zehirlilik</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• İletken katkı maddeleri ile kompozitler oluşturma</li> <li>• Kapsülleme</li> <li>• Düşük sıcaklık uygulamalarında yaygın kullanım</li> <li>• Hacimsel genişleme için yer sağlama</li> </ul>                 |
| İnorganikler | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Yüksek ısı iletkenlik</li> <li>• Yanıcı olmama</li> <li>• Düşük-yüksek (geniş aralık) ergime sıcaklığı</li> <li>• Düşük hacimsel genişleme</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Yüksek dereceli çok aşırı soğuma davranışı</li> <li>• Korozif etki</li> <li>• Faz ayrışması</li> <li>• Uyumsuz ergime</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diğer tuzlar ve katkı maddeleri ile karıştırma (Araştırmalar devam etmektedir.)</li> <li>• Kapsülleme</li> <li>• Farklı türlerin hareketliliğini sınırlamak için katkı maddelerinin kullanılması</li> </ul> |
| Ötektikler   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• En yüksek faz değişim entalpisi (gizli füzyon ısı) ve enerji depolama yoğunluğu</li> <li>• Geri dönüştürülebilme</li> <li>• Kesin ergime sıcaklığı</li> <li>• Uyumlu ergime</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kimyasal ve ısı kararlılık</li> <li>• Termofiziksel verilerde yokluk</li> <li>• Güçlü (rahatsız edici) koku</li> <li>• Yüksek maliyet (pahalılık)</li> </ul>                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Daha fazla araştırma ve geliştirme çalışmasının yapılması</li> <li>• Kapsülleme</li> </ul>  |

### 3. Faz Değiştiren Malzemelerin Kullanım Alanları

Faz değiştiren malzemeler termal enerji depolama kapasitesine sahip olmaları nedeniyle geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır. Bu malzemeler, enerji verimliliğini artırmak, sıcaklık dalgalanmalarını dengelemek ve sürdürülebilir enerji çözümleri geliştirmek için farklı endüstrilerde yaygın olarak tercih edilmektedir. Özellikle binaların iklimlendirilmesi, yenilenebilir enerji sistemleri, tekstil, otomotiv, elektronik, tıbbi uygulamalar ve gıda endüstrisi gibi alanlarda önemli avantajlar sunmaktadırlar [Sharma vd., 2015, Chang vd., 2023]. FDM'ler, belirli bir sıcaklık aralığında ısıyı absorbe ederek ve serbest bırakarak, sistemlerin daha verimli çalışmasına olanak tanır. Bu özellikleri sayesinde, enerji depolama, sıcaklık düzenleme ve konfor iyileştirme açısından önemli katkılar sağlamaktadırlar [Tawalbeh vd., 2023].

### 3.1. İnşaat ve bina teknolojilerinde kullanımı

FDM'ler, yapı malzemelerine entegre edilerek binaların enerji verimliliğini artırmak ve iç ortam konforunu iyileştirmek amacıyla kullanılmaktadır. Bina duvarları, tavanlar ve döşemelere yerleştirilen FDM'ler, gündüz fazla ısıyı depolayarak gece boyunca serbest bırakabilir, böylece iç mekan sıcaklığını dengede tutabilir. Araştırmalar, FDM içeren duvar sistemlerinin iç mekan sıcaklığında 1°C düşüş sağlayarak enerji tüketimini %30 oranında azaltabileceğini göstermektedir [Bai vd., 2020]. Özellikle sıfır enerjili binalar konsepti kapsamında, FDM'ler, ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme (HVAC) sistemleriyle entegre edilerek enerji tasarrufu sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Dünya genelinde HVAC sistemlerinin toplam hava kirliliğinin %50'sinden sorumlu olduğu göz önüne alındığında, FDM'lerin bu sistemlere entegre edilmesi, çevresel etkileri azaltmada kritik bir rol oynayabilir [Tawalbeh vd., 2023].



Şekil 5. FDM ile binaların ısıtılması ve soğutulması

### 3.2. Güneş enerjisi depolamada kullanımı

Güneş enerjisi sistemleri, döngüsel zamana bağlı olarak değişken bir enerji kaynağıdır ve bu nedenle gece ve bulutlu günlerde enerji sağlamaya devam etmek için bir depolama çözümüne ihtiyaç duyarlar. FDM'ler, bu gereksinimi karşılamak için güneş enerjisini depolamak ve ihtiyaç duyulduğunda serbest bırakmak amacıyla kullanılmaktadır [Dincer ve Rosen, 2021]. Güneş enerjisi ile çalışan su ısıtma sistemleri, kurutma üniteleri, pişirme sistemleri ve santrallerde kullanılan FDM'ler, düşük sıcaklıklardan (0–150 °C) yüksek sıcaklıklara kadar farklı uygulama alanlarına sahiptir. Bu bağlamda, tuz hidratlar, parafinler ve yağ asitleri gibi doğal malzemeler, güneş enerjisi depolamak için uygun termal özellikler sergilemektedir [Sharma vd., 2015].

### 3.3. Tekstil endüstrisinde kullanımı

FDM'ler, akıllı tekstil ürünlerinde, özellikle sıcaklık düzenleyici giysilerde, aktif bir bileşen olarak kullanılmaktadır. Mikrokapüller halinde tekstil liflerine dahil edilen FDM'ler, vücut sıcaklığını

dengelemek amacıyla ısı depolama ve serbest bırakma özelliklerine sahiptir. Bu özellikleri sayesinde, aşırı sıcak veya soğuk iklimlerde giysi içindeki konfor seviyesini artırabilirler. Özellikle spor ve askeri giysilerde kullanılan bu malzemeler, kullanıcıların ısı kaybını azaltmalarına yardımcı olur. FDM'lerin kurutucu maddelerle birleştirilmesi, havalandırmayı artırarak giysi içindeki nem seviyesini düzenlemeye olanak tanır. Böylece, terleme kaynaklı rahatsızlıklar minimize edilir ve giysilerin kullanım süresi uzatılır [Wang vd., 2023].



Şekil 6. FDM'nin çeşitli tekstil ürünlerinde kullanımı

### 3.4. Otomotiv sektöründe kullanımı

Otomotiv sektöründe FDM'ler, motor soğutma sistemlerinden yolcu kabini sıcaklık yönetimine kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Motorun durduğu anlarda kabinin sıcaklığını korumak için FDM'ler kullanılabilir. Araç hareket halindeyken FDM'ler ısıyı emer ve motor kapatıldığında bu ısıyı serbest bırakarak iç ortam sıcaklığını düzenler. Bu sistem, yakıt tasarrufu sağlarken aynı zamanda yolcu konforunu artırmaktadır. Ayrıca, start-stop sistemlerinde motorun daha hızlı ve verimli şekilde çalışmasını sağlamak amacıyla termal yönetim çözümlerinde FDM'ler kullanılmaktadır [İnternet: Automotive, 2023]. Elektrikli araçların bataryalarında sıcaklık yönetimi sağlamak için de kullanılan FDM'ler, batarya ömrünü uzatarak enerji verimliliğini artırmaktadır [Usman vd., 2018].

### 3.5. Havacılık ve uzay endüstrisinde kullanımı

FDM'ler, havacılık ve uzay endüstrisinde termal koruma ve sıcaklık yönetimi için kullanılmaktadır. Uzay araçları, atmosfer dışındaki aşırı sıcaklık değişimlerine maruz kaldığı için, FDM'ler bu ortamlarda stabil sıcaklık koşulları sağlamak için entegre edilmektedir. Özellikle uydu sistemlerinde, batarya sıcaklıklarının düzenlenmesi, güneş panellerinin verimliliğinin artırılması ve elektronik bileşenlerin korunması amacıyla FDM'ler büyük önem taşımaktadır [Kousksou vd., 2014].

### 3.6. Tıbbi ve sağlık uygulamalarında kullanımı

FDM'lerin tıbbi uygulamadaki kullanımı giderek artmaktadır. Özellikle, artrit, kas gerginliği ve nörolojik hastalıkların tedavisinde ısı terapisi sağlamak için kullanılan bu malzemeler, vücuda ısı aktarımı yaparak kan dolaşımını hızlandırabilir ve ağrıyı hafifletebilir. Tıbbi nakliyat alanında, ilaçların, aşuların ve biyolojik numunelerin belirli sıcaklık aralıklarında taşınmasını sağlamak amacıyla termal koruma sağlayan FDM içeren ambalaj çözümleri geliştirilmektedir. Bu sistemler, sıcaklık dalgalanmalarını önleyerek ilaçların etkinliğini korumada kritik bir rol oynamaktadır [Chavan vd., 2022].



**Şekil 7.** FDM'nin sağlık uygulamalarında kan numuneleri, organ taşımacılığı ve ameliyat masalarında sıcak- soğuk terapilerde kullanımı

### 3.7. Gıda endüstrisinde kullanımı

FDM'ler, gıda paketlenme ve depolama süreçlerinde de önemli bir yere sahiptir. Soğuk zincir taşımacılığında sıcaklık kontrolü sağlayarak gıda maddelerinin raf ömrünü uzatabilir ve bozulmalarını önleyebilirler [Arvanitoyannis vd., 1997, Martinez vd., 2003]. Özellikle dondurulmuş gıdaların nakliyesinde, FDM içeren ambalaj malzemeleri sıcaklık değişimlerine karşı tampon görevi görerek ürünlerin kalitesini koruyabilir. Ayrıca, gıda kurutma işlemlerinde de termal stabilizasyon sağlayarak ürünlerin besin değerlerini kaybetmeden saklanmasına olanak tanımaktadır [Gin ve Farid, 2010].



**Şekil 8.** FDM ile sıcak-soğuk gıda ürünlerinin taşınması ve muhafazası

### Sonuç

Faz değiştiren malzemeler, yüksek gizli ısı depolama kapasiteleri ve sıcaklık sabitleme yetenekleri sayesinde enerji depolama teknolojilerinin önemli bileşenlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Bu bölümde, FDM'lerin termodinamik temelleri ve faz geçiş mekanizmaları detaylandırılmış; katı-katı, katı-sıvı, sıvı-gaz ve katı-gaz faz değişimlerine göre sınıflandırılmaları literatür temelli olarak ele alınmıştır. Ayrıca, kimyasal yapılarına bağlı olarak organik, inorganik ve ötektik faz değiştiren malzemelerin enerji depolama performansları, avantajları ve teknik sınırlamaları değerlendirilmiştir.

İnceleme sonucunda, organik faz değiştiren malzemelerin özellikle düşük ve orta sıcaklık aralığındaki enerji depolama uygulamalarında kimyasal kararlılık ve güvenlik açısından avantaj sağladığı;

inorganik faz deđiřtiren malzemelerin ise yūksək enerji yođunlukları sayesinde daha yūksək sıcaklık aralıklarında etkin zūmler sunduđu gōrūlmektedir. Őtektik faz deđiřtiren malzemeler ise keskin erime sıcaklıkları ve yūksək gizli ısı kapasiteleri ile enerji depolama açısından önemli bir potansiyele sahip olmakla birlikte, Őretim ve maliyet kaynaklı sınırlamalar nedeniyle arařtırma ve geliřtirme sūrecinde yer almaktadır.

Enerji depolama sistemlerinin yanı sıra, faz deđiřtiren malzemelerin ısı yōnetimi ve sıcaklık kontrolū gerektiren farklı mūhendislik uygulamalarında da giderek daha yaygın biçimde kullanıldıđı gōrūlmektedir. Gelecekte, kapsūlleme teknikleri, kompozit yapıların geliřtirilmesi ve termal iletkenliđin artırılmasına yōnelik çalıřmalar sayesinde, faz deđiřtiren malzemelerin enerji depolama sistemlerine daha etkin ve yaygın biçimde entegre edilmesi beklenmektedir. Bu dođrultuda, faz deđiřtiren malzemeler sūrdūrūlebilir enerji sistemlerinin geliřtirilmesi ve enerji verimliliđinin artırılması açısından stratejik bir öneme sahiptir.

**KAYNAKLAR**

- Alva, G., Lin, Y. and Fang, G. (2018). An overview of thermal energy storage systems. *Energy*, 144, 341-378.
- Alva, G., Liu, L., Huang, X. and Fang, G. (2017). Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 693-706.
- Arvanitoyannis, L., Psomiadou, E., Biliaderis, C. G., Ogawa, H., Kawasaki, N., Nakayama, A. and Osaka. (1997). Biodegradable films made from low density polyethylene (LDPE), ethylene acrylic acid (EAA), polycaprolactone (PCL) and wheat starch for food packaging applications: part 3. *Starch*, 49.
- Bai, L., Xie, J., Farid, M. M., Wang, W. and Liu, J. (2020). Analytical model to study the heat storage of phase change material envelopes in lightweight passive buildings. *Building and Environment*, 169, 106531.
- Beaupere, N., Soupremanien, U. and Zalewski, L. (2018). Nucleation triggering methods in supercooled phase change materials (PCM), a review. *Thermochimica Acta*, 670, 184-201.
- Callister, W. D., and Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. John Wiley & Sons.
- Chandel, S. S. and Agarwal, T. (2017). Review of current state of research on energy storage, toxicity, health hazards and commercialization of phase changing materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 581-596.
- Chang, Y., Yao, X., Chen, Y., Huang, L. and Zou, D. (2023). Review on ceramic-based composite phase change materials: Preparation, characterization and application. *Composites Part B: Engineering*, 254, 110584.
- Chavan, S., Rudrapati, R. and Manickam, S. (2022). A comprehensive review on current advances of thermal energy storage and its applications. *Alexandria Engineering Journal*, 61(7), 5455-5463.
- Dincer, I. (2002). On thermal energy storage systems and applications in buildings. *Energy and Buildings*, 34(4), 377-388.
- Dincer, I. and Rosen, M. A. (2021). *Thermal energy storage: systems and applications*. New Jersey: Wiley.
- Esapour, M., Hosseini, M. J., Ranjbar, A. A., Pahamli, Y. and Bahrampoury, R. (2016). Phase change in multi-tube heat exchangers. *Renewable Energy*, 85, 1017-1025.
- Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K. and Al-Hallaj, S. (2004). A review on phase change energy storage: materials and applications. *Energy Conversion and Management*, 45(9-10), 1597-1615.
- Feldman, D., Banu, D., and Hawes, D. (1995). "Development and application of organic phase change mixtures in thermal storage gypsum wallboard." *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 36(2), 147-157.

- Fernández, A. I., Barreneche, C., Belusko, M., Segarra, M., Bruno, F. and Cabeza, L. F. (2017). Considerations for the use of metal alloys as phase change materials for high temperature applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 171, 275-281.
- Gin, B. and Farid, M. M. (2010). The use of PCM panels to improve storage condition of frozen food. *Journal of Food Engineering*, 100(2), 372-376.
- Huang, X., Alva, G., Jia, Y. and Fang, G. (2017). Morphological characterization and applications of phase change materials in thermal energy storage: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 128-145.
- İnternet: Automotive; air conditioning / electromobility. URL: <https://www.rubitherm.eu/en/applications/automotive>, Son Erişim Tarihi: 11.08.2023.
- İnternet: PCM RT-Line; versatile organic PCM for your application. URL: <https://www.rubitherm.eu/en/productcategory/organische-pcm-rt>, Son Erişim Tarihi: 11.08.2023.
- Kenisarin, M., and Mahkamov, K. (2007). "Salt hydrates as phase change materials for thermal energy storage: a review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(9), 1913-1965.
- Kousksou, T., Bruel, P., Jamil, A., El Rhafiki, T., and Zeraouli, Y. (2014). Energy storage: Applications and challenges. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 120, 59-80.
- Magendran, S. S., Khan, F. S. A., Mubarak, N. M., Vaka, M., Walvekar, R., Khalid, M., Abdullah, E. C., Nizamuddin, S. and Karri, R. R. (2019). Synthesis of organic phase change materials (PCM) for energy storage applications: A review. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 20, 100399.
- Martinez, P. J., Pinazo, J. M. and Velazquez, A. (2003). Passive thermal energy storage in refrigerated trailers. *ASHRAE Transactions*, 109, 324-328.
- Mehling, H., and Cabeza, L. F. (2008). *Heat and cold storage with PCM*. Springer.
- Nishad, S. and Krupa, I. (2022). Phase change materials for thermal energy storage applications in greenhouses: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102241.
- Ozdemir, E., and Karaman, I. (2013). "Martensitic transformations and their applications." *Materials Science and Engineering A*, 578, 66-82.
- Parameshwaran, R., Kalaiselvam, S., Harikrishnan, S. and Elayaperumal, A. (2012). Sustainable thermal energy storage technologies for buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2394-2433.
- Pielichowska, K., and Pielichowski, K. (2014). Phase change materials for thermal energy storage. *Progress in Materials Science*, 65, 67-123.
- Porter, D. A., Easterling, K. E., and Sherif, M. Y. (2009). *Phase Transformations in Metals and Alloys*. CRC press.
- Raam Dheep, G. and Sreekumar, A. (2014). Influence of nanomaterials on properties of latent heat solar thermal energy storage materials - A review. *Energy Conversion and Management*, 83, 133-148.



- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R. and Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318-345.
- Sharma, R. K., Ganesan, P., Tyagi, V. V., Metselaar, H. S. C. and Sandaran, S. C. (2015). Developments in organic solid-liquid phase change materials and their applications in thermal energy storage. *Energy Conversion and Management*, 95, 193-228.
- Sheikh, Y., Hamdan, M. O. and Sakhi, S. (2023). A review on micro-encapsulated phase change materials (EPCM) used for thermal management and energy storage systems: Fundamentals, materials, synthesis and applications. *Journal of Energy Storage*, 72, 108472.
- Su, W., Darkwa, J. and Kokogiannakis, G. (2015). Review of solid-liquid phase change materials and their encapsulation technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 373-391.
- Tawalbeh, M., Khan, H. A., Al-Othman, A., Almomani, F. and Ajith, S. (2023). A comprehensive review on the recent advances in materials for thermal energy storage applications. *International Journal of Thermofluids*, 18, 100326.
- Usman, H., Ali, H. M., Arshad, A., Ashraf, M. J., Khushnood, S., Janjua, M. M. and Kazi, S. N. (2018). An experimental study of PCM based finned and un-finned heat sinks for passive cooling of electronics. *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, 54(12), 3587-3598.
- Wang, F., Pang, D., Liu, X., Liu, M., Du, W., Zhang, Y. and Cheng, X. (2023). Progress in application of phase-change materials to cooling clothing. *Journal of Energy Storage*, 60, 106606.
- Zhan, H., Mahyuddin, N., Sulaiman, R., and Khayatian, F. (2023). Phase change material (PCM) integrations into buildings in hot climates with simulation access for energy performance and thermal comfort: A review. *Construction and Building Materials*, 397, 132312.
- Zhang, Y., Zhou, G., Lin, K., Zhang, Q., and Di, H. (2010). "Application of latent heat thermal energy storage in buildings." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), 939-949.
- Zhou, D., Zhao, C. Y., and Tian, Y. (2012). Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy*, 92, 593-605.



# Bölüm 12

## GEMİ İNŞA SEKTÖRÜNDE ANA MAKİNE SEÇİMİ İÇİN VIKOR YÖNTEMİNE DAYALI ÇOK KRİTERLİ BİR DEĞERLENDİRME

*Yıldız Şahin<sup>1</sup>, Musa Padır<sup>2</sup>, Ahmet Üçüncü<sup>3</sup>*

1 Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kocaeli (0000-0002-6283-5340)

2 Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mühendislik Yönetimi Anabilim Dalı, Kocaeli (0009-0003-9609-2690)

3 Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mühendislik Yönetimi Anabilim Dalı, Kocaeli (0009-0005-5001-6005)

## 1. GİRİŞ

Gemi inşa sektörü, küresel ticaretin bel kemiğini oluşturan deniz taşımacılığının temelini oluşturur aynı zamanda karmaşık ve titiz bir süreç gerektiren büyük ölçekli projelerin yapıldığı kapsamlı bir alandır. Bu sektörde, gemilerin verimliliği, güvenilirliği ve operasyonel maliyetleri üzerinde büyük etkisi olan ana makine seçimi, kritik bir karar aşamasıdır. Ana makine, geminin itici gücünü sağlayan ve denizdeki hareketini mümkün kılan en önemli bileşenlerden biridir. Dolayısıyla, doğru ana makine seçimi, geminin performansı, yakıt tüketimi, bakım gereksinimleri ve çevresel etkileri üzerinde doğrudan belirleyici rol oynar (Yazır, 2023; Vincent vd., 2024).

Gemi inşa ve denizcilik faaliyetlerinde karar verme süreçleri; ekonomik, teknik, çevresel ve emniyet odaklı kriterlerin eş zamanlı değerlendirilmesini gerektirir. Literatürde bu karmaşıklığı aşmak için Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinin kullanımı son on yılda belirgin bir artış göstermiştir.

Ana makine seçiminde değerlendirmeye alınması gereken çok sayıda kriter bulunmaktadır. Bunlar arasında geminin tipi ve boyutu, seyir profili, yakıt türü, emisyon düzenlemeleri, işletme maliyetleri ve teknik bakım olanakları yer almaktadır. Örneğin, bir konteyner gemisi için yüksek hız ve yakıt verimliliği ön planda iken, bir tanker için güvenilirlik ve uzun menzil daha kritik olabilir. Ayrıca, uluslararası denizcilik örgütlerinin belirlediği emisyon standartlarına uyum sağlamak, modern gemi makineleri için vazgeçilmez bir gereklilik haline gelmiştir.

Bu çalışma, gemi inşa sektöründe ana makine seçim sürecini ayrıntılı bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır. Öncelikle, karar verme probleminin incelenmesinde kullanılan yöntem olan VIKOR yöntemi ( Vise Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje ) metodolojik olarak ele alınmış, yöntemin uygulama adımları açıklanmıştır. Daha sonra ele alınan karar probleminde farklı firmalar tarafından üretilen ve farklı özellikler açısından birbirlerine avantaj sağlayan ana makine türleri ve bunların teknik özellikleri ortaya konulmuş, ardından seçim kriterleri ve stratejileri araştırılmıştır. Belirlenen kriterler doğrultusunda ana makine seçim probleminin çözülmesi sağlanmış, uygun makine seçimi yapılarak sonuçlar kısmında genel bir görüş belirtilmiştir. Böylece bu çalışma doğrultusunda, gemi inşa projelerinde kullanılacak en uygun ana makinenin nasıl seçilebileceğine dair bir rehber sunulması amaçlanmıştır.

## 2. GEMİ İNŞA SEKTÖRÜNDE ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİ

Son yıllarda farklı stratejik karar verme problemlerine çözüm getirmede başarı ile uygulanan ÇKKV yöntemleri literatürde geniş bir yer tutar (Şahin & Bozkurt, 2021). Gemi inşa sektörü; yüksek maliyetler, karmaşık mühendislik süreçleri ve çevresel düzenlemeler nedeniyle stratejik kararların verilmesinin zor olduğu bir alandır. Bu bölümde gemi inşa sektöründe ortaya çıkan bazı stratejik karar alma süreçlerinde kullanılan ÇKKV yöntemlerine örnekler verilmiştir.

### 1. Tersane Yer ve Gemi Tipi Seçimi

Gemi inşa sektöründe tersane stratejileri ve inşa edilecek gemi tipinin belirlenmesi kararları genellikle birden fazla kriter içerir ve bu kriterler arasında performans, maliyet, teknik gereksinimler ve çevresel etkiler bulunur. Balbaş ve Turan (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada bulanık sayılarla analiz edilen AHP ve TOPSIS yöntemleri kullanılarak bir örnek tersanede inşa edebilecek en uygun gemi

tipinin seçimi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada bulanık ÇKKV yaklaşımları, belirsizlik ve uzman yargılarını modellemek için etkin olarak kullanılmıştır.

## 2. Tedarikçi ve Alt Tedarik Seçimi

Gemi inşa projelerinde tedarikçi seçimi, kalite, teslim süresi, maliyet ve teknik yeterlilik gibi kriterler dikkate alınarak yapılır. Literatürde, genel mühendislik ve denizcilik uygulamaları kapsamında tedarikçi değerlendirmelerinin çoğunlukla AHP ve TOPSIS gibi yöntemlerle yapıldığı belirtilmiştir; bu bağlamda AHP, kriter ağırlıklarını belirlemede ve TOPSIS ise alternatifleri ideal çözüme göre sıralamada kullanılmaktadır (Tamer vd., 2021).

## 3. Gemi Tasarımı ve Donanım Değerlendirmesi

Gemi tasarımı, sistem seçimi ve ekipman yerleştirmesi gibi kararlar, çok sayıda kriter içermektedir; bu nedenle hibrit ÇKKV yaklaşımları gerekebilir. Chen ve arkadaşları (2023) tarafından sunulan çalışmada, Geliştirilmiş ISM, AHP ve Fuzzy TOPSIS yöntemlerinin birleştirilmesiyle gemi ekipmanlarının uygunluk değerlendirme sistematiği yapılmıştır. Bu çerçevede AHP kriter ağırlıklarının belirlenmesini sağlarken TOPSIS yöntemi alternatiflerin sıralanmasında kullanılmıştır (Chen vd., 2023). Benzer şekilde, Şahin ve arkadaşlarının (2020) çalışmasında Fuzzy TOPSIS algoritması kullanılarak kuru dökme yük gemisi seçiminde alternatif gemi tiplerinin değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu, yatırım-karar kararında farklı kriterlerin dengeli bir şekilde ele alınmasına yardımcı olur.

## 4. Gemi Ana Makine ve Sistem Seçimi

Bir diğer uygulama alanı gemi ana makine ve diğer temel sistemlerin seçimidir. Gürgeç ve Altın (2023) tarafından yapılan çalışmada Fuzzy AHP yöntemi ile ana makine seçim kriterleri ekonomik, teknik ve şirket ile ilgili alt kriterler açısından değerlendirilmiş ve belirsizlik içeren uzman değerlendirmeleri modellenmiştir.

## 5. Risk, Performans ve Emniyet Analizi

ÇKKV yöntemleri, yalnızca seçim problemlerinde değil aynı zamanda risk değerlendirmesi ve performans ölçümleri gibi karmaşık karar alanlarında da kullanılmaktadır. Son yıllarda özellikle DEMATEL ve AHP'nin hibrit kullanımı, kritik kriterler arasındaki nedensel ilişkileri ortaya koymakta ve gemi inşa süreçlerindeki riskleri daha etkin analiz etmektedir. Örneğin, bir çalışmada gemi tersanesi performansını değerlendirirken fuzzy DEMATEL-AHP yöntemini kullanılmıştır; bu yaklaşım hem kriterlerin ağırlıklandırılmasını hem de kriterler arası neden-sonuç ilişkilerinin belirlenmesini sağlaması bakımından önemlidir (Imam Baihaqi vd., 2023).

## 3. METODOLOJİ

Gemi makine seçimi literatüründe son yıllarda öne çıkan en önemli eğilimlerden biri, kriterler arasındaki çatışmaları rasyonel bir şekilde yönetebilen VIKOR yöntemidir. Literatürde VIKOR, "maksimum grup faydası" ile "minimum bireysel pişmanlık" prensiplerini dengelemesi bakımından, teknik ve ekonomik kriterlerin yarıştığı gemi inşa projelerinde tercih edilmektedir.

Kuo ve Liang (2012), gemi makine dairesi ekipmanlarının seçiminde VIKOR yönteminin, alternatifler arasındaki farkın az olduğu durumlarda bile en stabil sıralamayı sunduğunu belirtmiştir.

Özellikle Bulanık VIKOR uygulamaları, makine performans verilerinin (titreşim, gürültü, bakım kolaylığı gibi) net sayılarla ifade edilemediği durumlarda literatürde geniş yer bulmuştur. Bu durum, mevcut karar probleminin çözümünde kullanılacak olan VIKOR yönteminin, gemi makine seçimi gibi çok boyutlu bir problemde hem bilimsel bir temel hem de uygulama açısından yüksek bir doğruluk düzeyi sunacağını desteklemektedir.

### 3.1. VIKOR YÖNTEMİ

Opricovic ve Tzeng tarafından 2004 yılında geliştirilen VIKOR yöntemi, literatürde yaygın kullanım alanı bulmuş çok kriterli karar verme yöntemlerinden biridir. VIKOR kelimesinin kökeni Sırpça "Vise Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje" ifadesinin kısaltmasıdır. Bu ifade dilimizde "çok kriterli optimizasyon ve uzlaşık çözüm" anlamına gelmektedir (Güllü, 2019).

VIKOR yöntemi, karar vericinin karar verme sürecinin başlangıç aşamasında tercihlerini kesin olarak belirleyemediği durumlarda kullanım için elverişli bir metodoloji olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntem, çelişkili kriterlerin mevcut olduğu durumlarda, alternatifleri sıralayarak karar vericinin tatminkar bir çözüme ulaşmasını kolaylaştırmak için alternatifleri sıralamakta ve bir alternatif kümesinden uzlaşmacı bir çözüm elde etmektedir. Uzlaşık çözüm, ideal çözüme en yakın alternatif olarak değerlendirilmektedir.

Uzlaşık çözüm kavramı, belirli koşullar altında alternatifler için çok kriterli sıralama indeksi oluşturulması ve ideal çözüme en yakın kararın verilmesi sürecini ifade eder. Bu süreçte, belirlenen karar kriterleri kapsamında her bir alternatifin değerlendirildiği varsayılır, ideal alternatife yakın olma durumuna göre karşılaştırılarak uzlaşık sıralamaya ulaşılır. VIKOR yöntemi, bu bağlamda, karar verici grubun karar süreci üzerindeki etkisini de dikkate alarak, grup dinamiklerinin sonuç üzerinde belirleyici olmasına olanak tanımaktadır. Ulaşılan uzlaşık çözüm; "çoğunluk" açısından "maksimum grup faydasını" sağlarken, "karşıt görüşte olanlar" için de "minimum pişmanlığı" temin etmektedir. Bu iki karşıt amacı dengeleyerek, karar vericiler arasında geniş kabul gören bir çözüm sunar. VIKOR yönteminin bu özelliği, onu özellikle çok kriterli karar verme problemlerinde ideal çözüme en yakın uzlaşık çözümü bulmada etkili bir araç haline getirmektedir (Opricovic & Tzeng, 2007; Tzeng & Huang, 2011).

Yöntem, alternatiflerin çeşitli kriterler bazında performanslarının değerlendirilmesi ve ideal çözüme olan uzaklıklarının hesaplanması yoluyla çalışır. Bu yöntemde, her bir alternatif için pozitif ideal çözüm (en iyi performans gösteren) ve negatif ideal çözüm (en kötü performans gösteren) belirlenir. Alternatiflerin ideal çözümlere olan uzaklıkları, VIKOR endeksi kullanılarak hesaplanır ve bu hesaplama sonucunda uzlaşık sıralama elde edilir. VIKOR yöntemi, çok kriterli karar verme süreçlerinde özellikle belirsizliklerin ve çatışan kriterlerin varlığı durumunda önemli avantajlar sunar. Bu yöntem, karar vericilerin önceliklerinin tam olarak belirlenemediği veya değişken olduğu durumlarda bile etkili sonuçlar üretir. Ayrıca, VIKOR yöntemi, farklı sektörlerde ve uygulama alanlarında geniş bir kullanım alanına sahiptir ve literatürde bu yöntemin başarılı uygulamaları sıklıkla rapor edilmiştir. Sonuç olarak, VIKOR yöntemi, çok kriterli karar verme problemlerinde ideal çözüme en yakın uzlaşık çözümü bulmak için kullanılan etkili ve geniş kabul gören bir metodolojidir (Kasap vd., 2020). Bu konuda 3. bölümde VIKOR yönteminin uygulama alanları sektörlerden örnekler verilerek belirtilmiştir.

### 3.2. VIKOR Yönteminin Uygulama Adımları

**1. Uygulama Adımı:** Karar verme probleminde belirlediğimiz kriterler için öncelikle ( $f_i^*$ ) ile belirtilen en iyi ve ( $f_i^-$ ) ile belirtilen en kötü değerlerin belirlenmesi gerekir (Opricovic & Tzeng, 2007).

Karar problemimizde kullanılan kriterlerin karar modeli için fayda (yararlı) etkisi var ise kullanacağımız denklemlerimiz; (1) ve (2) nolu denklemlerdir. Diğer yandan karar modeli için maliyet etkisi söz konusu ise bu durumda kullanacağımız denklemler (3) ve (4) nolu denklemler olacaktır. Denklemlerde kriterler  $i$  ile gösterilmektedir. Alternatifler ise  $j$  ile gösterilmektedir (Ünal, 2019).

$$f_i^* = \min f_{ij}, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

$$f_i^- = \max f_{ij}, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

$$f_i^* = \max f_{ij}, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

$$f_i^- = \min f_{ij}, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

**2. Uygulama Adımı:** Karar matrisini oluşturan değerler, birimlerinden arındırılarak karşılaştırılabilir bir seviyeye getirilmek amacıyla normalizasyon işlemine tabi tutulur. Bu işlemin ardından normalize edilmiş karar matrisi ağırlıklandırılması gerekmektedir. Ardından karar matrisinde bulunan alternatif seçenekler için  $S_j$  ve  $R_j$  değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu hesaplama için (5) ve (6) nolu denklemler kullanılır. Denklemlerde görülen  $w_i$  değeri ise kriter ağırlıklarını belirtmektedir. Kriter ağırlıklarının toplam değeri ise 1 değerine eşit olmalıdır (Kasap vd., 2020).

$$\sum w_i = 1$$

$$S_j = \sum_{i=1}^n w_i \frac{(f_i^* - f_{ij})}{(f_i^* - (f_i^-))} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

$$R_j = \max \left[ w_i \frac{(f_i^* - f_{ij})}{(f_i^* - (f_i^-))} \right] \quad (6)$$

$S_j$  ve  $R_j$  değerleri, karar matrisinde bulunan  $j$ . alternatifin pozitif olarak ideal (en iyi) ve negatif olarak ideal (en kötü) çözüme uzaklığını ifade etmektedir.  $w_i$  değeri ise  $i$ . kriterin karar matrisinde bulunan diğer kriterlere göre nispi önemini ifade eden ağırlıktır. Kriterler arasında önem dereceleri vardır. Bu önem derecelerine göre yüksek önem derecesine sahip kriterlerin ağırlıkları daha yüksek verilirse kriterlerin karar problemi çözümünde daha efektif olması sağlanabilir. Diğer yandan kriter ağırlıklarının doğru tayin edilmesi de karar probleminin çözümünde ortaya çıkan sonuçların daha güvenilir olması açısından yüksek derecede önem arz etmektedir.

**3. Uygulama Adımı:** Karar matrisinde bulunan alternatif seçenekleri için  $Q_j$  değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu hesaplama için (7) nolu denklem kullanılır.

$$Q_j = v \frac{(S_j - S^*)}{(S^- - S^*)} + (1 - v) \frac{(R_j - R^*)}{(R^- - R^*)} \quad (7)$$

Bu denklemde;

$$\begin{aligned} S^* &= \min j(S_j) \\ S^- &= \max j(S_j) \\ R^* &= \min j(S_j) \\ R^- &= \max j(S_j) \end{aligned}$$

değerlerini belirtir.  $v$  değeri, maksimum grup faydasını sağlayan stratejinin ağırlığını belirtir.  $(1-v)$  değeri ise karşıt görüştekilerin minimum pişmanlığını gösteren stratejinin ağırlığı belirtir (Ertuğrul & Karakaşoğlu, 2009).

Karar probleminin çözümünde  $v$  değeri için ( $>0,5$ ) büyük seçilirse  $Q_j$  indeksine çoğunluğun olumlu tutum gösterme eğiliminde olduğu kabul edilir. Diğer yandan  $v$  değeri ( $<0,5$ ) küçük seçildiği takdirde ise  $Q_j$  indeksine çoğunluğun olumsuz tutum benimsediği anlamı ortaya çıkacaktır. Bu nedenle genellikle  $v$  değeri ( $=0,5$ ) seçilmesi sağlanarak değerlendirme grubunun hem olumlu hem de olumsuz tutum sergiledikleri düşünülmektedir (Paksoy, 2017).

**4. Uygulama Adımı:** Yaptığımız hesaplamalar ile elde ettiğimiz  $S_j$ ,  $R_j$  ve  $Q_j$  değerlerimiz ile alternatif seçenekleri,  $Q_j$  değerine göre küçükten büyüğe doğru sıralanır.

**5. Uygulama Adımı:** Yapılan bu sıralama sonucunda birinci olarak bulunan alternatifin diğer alternatif seçeneklerine göre en iyi alternatif olup olmadığına dair kararının verilmesi, geçerlilik testleri sağlanmasına göre netleşmektedir. Şayet elde ettiğimiz bu sonuçların geçerlilik testlerini sağlama neticesinde minimum  $Q$  değerine sahip alternatif en iyi alternatif seçeneği olarak belirlenir. Yapılan bu geçerlilik testlerinin iki koşulu vardır. İlk koşul; kabul edilebilir avantaj koşuludur. İkinci koşul ise; kabul edilebilir istikrar koşuludur.

**Koşul 1: Kabul Edilebilir Avantaj**

Bu koşul, en iyi seçenek ve ona en yakın ikinci seçenek arasında belirgin bir farkın varlığını araştırmaktadır (Ünal, 2019).

Koşulun sağlanması için  $Q_2 - Q_1 \geq D_Q$  olmalıdır. Burada;  $Q_1$  değeri yapılan sıralamanın sonrasında ilk sıradaki alternatifin  $Q$  değerini belirtir.  $Q_2$  ise ortaya çıkan sıralama sonrasında ikinci sıradaki alternatifin  $Q$  değerini belirtir.  $j$  değeri ise alternatif sayısını belirtir.  $j < 4$  ise;  $D_Q$  0,25 olarak alınır.

Diğer durumlarda ise;  $D_Q = \frac{1}{j-1}$  olur.

**Koşul 2: Kabul Edilebilir İstikrar**

Bu ikinci koşul da, ortaya konulan sıralamada, mevcut uzlaşık çözümün, istikrarı sağladığının söylenebilmesi için sağlanmalıdır. Bu koşula göre, en iyi yani en küçük  $Q$  ( $Q_1$ ) değerine sahip olan alternatifin  $S$  ve  $R$  değerlerinden en az biri de en iyi değere sahip olmalıdır. Her iki koşulun da sağlanması durumunda, nihai sıralamanın hem istikrarlı hem de kullanılabilir olduğu sonucuna varılabilir. Eğer koşullardan biri sağlanmaz ise, uzlaşık çözüm kümesi oluşturulur. Şayet Koşul 1 sağlanmıyor ise tüm alternatifler ( $j=1, 2, \dots, m$ ) için (8) nolu denklemde verilen koşul araştırılır ve bu koşulu sağlayan alternatifler çözüm kümesine dahil edilir.

$$QA_j - QA_1 < D_Q \quad (8)$$

Koşul 2'nin sağlanmadığı durumda  $A1$  ve  $A2$  alternatifleri çözüm kümesini oluşturur (Kasap vd., 2020).

#### 4. ANA MAKİNE SEÇİMİNDE VIKOR YÖNTEMİ UYGULAMASI

Bu çalışmada Gemi İnşa sektöründe kullanılan ana makine seçimi ÇKKV yöntemlerinden VIKOR ile değerlendirilmiştir. Gemi inşaatı sektörü, karmaşık çok kriterli karar verme süreçlerini içeren bir



alandır. Özellikle ana makine seçimi, geminin performansı, güvenilirliği ve maliyeti üzerinde doğrudan etkiye sahip kritik bir karardır. Bu nedenle, gemi inşaatı mühendisleri ve yöneticileri için doğru ana makineyi seçmek, başarılı bir proje için hayati öneme sahiptir.

VIKOR yöntemi, ana makine seçim sürecinde çeşitli kriterlerin değerlendirilmesine izin verir. Bu kriterler arasında güç, verimlilik, dayanıklılık, bakım kolaylığı, maliyet ve çevresel etkiler gibi faktörler bulunabilir. Her bir kriter, geminin performansı ve işletme maliyeti üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olabilir.

İlk adım, VIKOR yöntemi için uygun kriterlerin belirlenmesidir. Bu kriterler, gemi inşaat projesinin özelliklerine, müşteri gereksinimlerine ve sektörün genel koşullarına göre belirlenmelidir. Sonra, VIKOR yöntemi ile alternatif ana makine seçenekleri bu belirlenen kriterlere göre değerlendirilir. Her bir alternatif, kriterlere göre puanlanır ve ağırlıklı sıralama yöntemi kullanılarak en uygun seçenek belirlenir. VIKOR, karar vericilere en uygun seçeneği belirleme konusunda net bir rehberlik sunar ve karar verme sürecini objektif ve sistematik bir şekilde yapılmasını sağlar.

Uygulamada öncelikle karar problemi çözümünde kullanılacak kriterler ve ağırlıkları belirlenmiştir. Kriterlerin belirlenmesi sürecinde hem literatürden hem de sektörde çalışan deneyimli karar verici mühendislerin görüşlerinden faydalanılmıştır. Söz konusu kriterler ve açıklamaları Tablo 1’de gösterilmiştir.

**Tablo 1 : Karar Problemi Kriterleri ve Açıklamaları**

| Kriter No | Açıklamaları                     | Kısaltma    |
|-----------|----------------------------------|-------------|
| 1. Kriter | Maliyet                          | Mlyt.       |
| 2. Kriter | Bakım ve İşletme Maliyeti        | Bkm&İşMlyt. |
| 3. Kriter | Makine Gücü                      | Mk_Gc       |
| 4. Kriter | Yakıt Sarfiyatı                  | Ykt_Srf.    |
| 5. Kriter | Makine Dairesinde Kapladığı Alan | Alan        |
| 6. Kriter | Ses ve Titreşim Değeri           | S&T         |
| 7. Kriter | Yedek Parça ve Servis Kolaylığı  | YP_SK       |
| 8. Kriter | Makine Ağırlığı                  | Mk_Ağr      |

Alternatifler, 10 farklı ana makina modelinden oluşmaktadır. Ana makina modellerine ait veriler ilgili ana makinalara ait teknik dokümanlar ve şirket yazışmaları ile belirlenmiştir. Alternatif ana makina modelleri ve teknik özellik verileri Tablo 2’ de gösterilmiştir.

**Tablo 2 : Ana Makina Alternatiflerine Ait Teknik Özellikler**

| Mak. No. | Marka Model           | Nox Kuralı. | Güç   | Ağırlık | Alan m <sup>2</sup> | Devir Gücü | Yakıt Sarfıyatı |
|----------|-----------------------|-------------|-------|---------|---------------------|------------|-----------------|
| M1       | Wartsila Genset 16V31 | IMO Tier 3  | 9760  | 92.5    | 142.60736           | 750        | 167.7           |
| M2       | Hyundai H35DFVP       | IMO Tier 2  | 10000 | 88      | 107.8053            | 750        | 181             |
| M3       | Hyundai HP46/60V      | IMO Tier 3  | 8750  | 126     | 121.8672            | 600        | 174             |
| M4       | MAN L51/60DF          | IMO Tier 2  | 9000  | 148     | 203.221184          | 514        | 183             |
| M5       | MAN L48/60CR          | IMO Tier 2  | 9600  | 135     | 186.137792          | 514        | 176             |
| M6       | MAN V32/44 CR         | IMO Tier 2  | 8960  | 87      | 113.5716            | 720        | 177             |
| M7       | MAN V28/33D           | IMO Tier 2  | 9100  | 47.9    | 40.893567           | 1000       | 190             |
| M8       | CATERPILLAR VM32E     | IMO Tier 3  | 8960  | 65      | 87.769344           | 750        | 181             |
| M9       | CATERPILLAR M 43      | IMO Tier 3  | 9450  | 91      | 166.6368            | 514        | 182             |
| M10      | WARTSILA 8L46F        | IMO Tier 3  | 9600  | 124     | 137.3131            | 600        | 175             |

IMO (International Maritime Organization) Tier, Uluslararası Denizcilik Örgütü'nün gemi motorları için koyduğu emisyon standartlarıdır. Bu standartlar, gemilerin çevreye zararlı gaz emisyonlarını azaltmayı amaçlar ve farklı seviyelerde belirlenmiştir. Tier, seviyeleri belirtmek için kullanılan bir terimdir ve her bir seviye daha sıkı emisyon limitleri getirir. IMO Tier standartları üç ana seviyede düzenlenmiştir:

IMO Tier I: 2000 yılından itibaren uygulamaya konulan bu standart, azot oksit (NO<sub>x</sub>) emisyonlarını belli bir seviyeye çekmeyi amaçlar. Bu seviye, 2000 yılından önce inşa edilen gemiler için geçerlidir.

IMO Tier II: 2011 yılında yürürlüğe giren bu seviye, Tier I'e göre daha sıkı emisyon limitleri getirir. Bu standart, 1 Ocak 2011 tarihinden itibaren inşa edilen gemi motorları için geçerlidir.

IMO Tier III: En sıkı emisyon limitlerini içeren bu standart, 1 Ocak 2016 tarihinden itibaren Kuzey Amerika ve Karayipler gibi belirli Emission Control Area (ECA) bölgelerinde uygulanmaktadır. Bu bölgelerde, gemi motorlarının NO<sub>x</sub> emisyonlarını Tier II'ye kıyasla yüzde 80 oranında azaltması gerekmektedir.

IMO Tier standartları, deniz taşımacılığının çevresel etkilerini azaltmak, hava kirliliğini kontrol altına almak ve iklim değişikliğiyle mücadele etmek amacıyla uygulanmaktadır. Bu standartlar, gemi sahiplerinin ve işletmecilerinin daha çevre dostu teknolojilere yatırım yapmasını teşvik eder ve bu sayede denizcilik sektörünün sürdürülebilirliğine katkıda bulunur (Yaraş, 1999).

Alternatif ana makina seçim problemine ait karar matrisi Tablo 3'te gösterilmiştir.

**Tablo 3: Ana Makine Seçim Problemi Karar Matrisi**

| Makine No.                          | Mlyt.  | Bkm&İşMlyt | Mk_Gc | Ykt_Srf | Alan       | S&T   | YP_SK | Mk_Ağr |
|-------------------------------------|--------|------------|-------|---------|------------|-------|-------|--------|
| M1                                  | \$1.72 | 4          | 9760  | 167.7   | 142.60736  | 187.5 | 4     | 92.5   |
| M2                                  | \$1.80 | 3          | 10000 | 181     | 107.8053   | 187.5 | 3     | 88     |
| M3                                  | \$1.60 | 3          | 8750  | 174     | 121.8672   | 150   | 3     | 126    |
| M4                                  | \$1.65 | 1          | 9000  | 183     | 203.221184 | 128.5 | 1     | 148    |
| M5                                  | \$1.75 | 1          | 9600  | 176     | 186.137792 | 128.5 | 1     | 135    |
| M6                                  | \$1.65 | 1          | 8960  | 177     | 113.5716   | 180   | 1     | 87     |
| M7                                  | \$1.70 | 1          | 9100  | 190     | 40.893567  | 250   | 1     | 47.9   |
| M8                                  | \$1.40 | 2          | 8960  | 181     | 87.769344  | 187.5 | 2     | 65     |
| M9                                  | \$1.51 | 2          | 9450  | 182     | 166.6368   | 128.5 | 2     | 91     |
| M10                                 | \$1.68 | 4          | 9600  | 175     | 137.3131   | 150   | 4     | 124    |
| <b>En İyi (<math>f_i^*</math>)</b>  | \$1.40 | 1          | 10000 | 167.7   | 40.893567  | 128.5 | 1     | 47.9   |
| <b>En Kötü (<math>f_i^-</math>)</b> | \$1.80 | 4          | 8750  | 190     | 203.221184 | 250   | 4     | 148    |

Tablo 3'teki veriler kullanılarak öncelikle Normalize Karar Matrisi elde edilir. Normalize karar matrisi ve firmadaki uzmanlara ait görüşler doğrultusunda elde edilen kriter ağırlıkları Tablo 4'te görüldüğü gibidir.

**Tablo 4: Normalize Karar Matrisi ve Belirlenen Kriter Ağırlıkları**

| W          | 0.22  | 0.14       | 0.19  | 0.17    | 0.11 | 0.08 | 0.03  | 0.06   |
|------------|-------|------------|-------|---------|------|------|-------|--------|
| Makine No. | Mlyt. | Bkm&İşMlyt | Mk_Gc | Ykt_Srf | Alan | S&T  | YP_SK | Mk_Ağr |
| M1         | 0.80  | 1.00       | 0.19  | 0.00    | 0.63 | 0.49 | 1.00  | 0.45   |
| M2         | 1.00  | 0.67       | 0.00  | 0.60    | 0.41 | 0.49 | 0.67  | 0.40   |
| M3         | 0.50  | 0.67       | 1.00  | 0.28    | 0.50 | 0.18 | 0.67  | 0.78   |
| M4         | 0.63  | 0.00       | 0.80  | 0.69    | 1.00 | 0.00 | 0.00  | 1.00   |
| M5         | 0.88  | 0.00       | 0.32  | 0.37    | 0.89 | 0.00 | 0.00  | 0.87   |
| M6         | 0.63  | 0.00       | 0.83  | 0.42    | 0.45 | 0.42 | 0.00  | 0.39   |
| M7         | 0.75  | 0.00       | 0.72  | 1.00    | 0.00 | 1.00 | 0.00  | 0.00   |
| M8         | 0.00  | 0.33       | 0.83  | 0.60    | 0.29 | 0.49 | 0.33  | 0.17   |
| M9         | 0.28  | 0.33       | 0.44  | 0.64    | 0.77 | 0.00 | 0.33  | 0.43   |
| M10        | 0.70  | 1.00       | 0.32  | 0.33    | 0.59 | 0.18 | 1.00  | 0.76   |

Normalize karar matrisi, uzmanlarca belirlenen kriter ağırlıkları ile çarpılarak Tablo 5'te yer alan Ağırlıklı Normalize Karar Matrisini oluşturur.

**Tablo 2 : Ağırlıklı Normalize Karar Matrisi**

| Makine No. | Mlyt. | Bkm&İşMlyt | Mk_Gc | Ykt_Srf | Alan  | S&T   | YP_SK | Mk_Ağr |
|------------|-------|------------|-------|---------|-------|-------|-------|--------|
| M1         | 0.178 | 0.139      | 0.037 | 0.000   | 0.070 | 0.040 | 0.028 | 0.025  |
| M2         | 0.222 | 0.093      | 0.000 | 0.099   | 0.046 | 0.040 | 0.019 | 0.022  |
| M3         | 0.111 | 0.093      | 0.194 | 0.047   | 0.055 | 0.015 | 0.019 | 0.043  |
| M4         | 0.139 | 0.000      | 0.156 | 0.114   | 0.111 | 0.000 | 0.000 | 0.056  |
| M5         | 0.194 | 0.000      | 0.062 | 0.062   | 0.099 | 0.000 | 0.000 | 0.048  |
| M6         | 0.139 | 0.000      | 0.162 | 0.070   | 0.050 | 0.035 | 0.000 | 0.022  |
| M7         | 0.167 | 0.000      | 0.140 | 0.167   | 0.000 | 0.083 | 0.000 | 0.000  |
| M8         | 0.000 | 0.046      | 0.162 | 0.099   | 0.032 | 0.040 | 0.009 | 0.009  |
| M9         | 0.061 | 0.046      | 0.086 | 0.107   | 0.086 | 0.000 | 0.009 | 0.024  |
| M10        | 0.156 | 0.139      | 0.062 | 0.055   | 0.066 | 0.015 | 0.028 | 0.042  |

Bu adımda her bir makine için normalize edilmiş farklar ağırlıklarla çarpılarak toplanır (S) ve bu çarpımların en büyüğü seçilir (R). Q değeri, S ve R değerlerinin normalize edilip v (strateji ağırlığı) katsayısı ile birleştirilmesiyle bulunur. Genellikle  $v=0.5$  (uzlaşmacı yaklaşım) alınır.

Tablo 6'da her alternatif ana makina için hesaplanan Q, S, R değerleri gösterilmektedir. Q değeri 0'a ne kadar yakınsa, o alternatif o kadar başarılıdır.

**Tablo 3 :** Farklı “v” Katsayılarına Göre Hesaplanan Uzlaşık Değerler (Q)

| Makine No. | Si    | Ri    | Q (v=0.0) | Q (v=0.25) | Q (v=0.50) | Q (v=0.75) | Q (v=1.0) | Sıralama (v=0.5) |
|------------|-------|-------|-----------|------------|------------|------------|-----------|------------------|
| M1         | 0.517 | 0.178 | 0.617     | 0.505      | 0.392      | 0.280      | 0.167     | 3                |
| M2         | 0.541 | 0.222 | 1.000     | 0.950      | 0.899      | 0.849      | 0.798     | 10               |
| M3         | 0.577 | 0.194 | 0.757     | 0.817      | 0.878      | 0.939      | 1.000     | 9                |
| M4         | 0.575 | 0.156 | 0.426     | 0.567      | 0.707      | 0.848      | 0.989     | 8                |
| M5         | 0.466 | 0.194 | 0.757     | 0.662      | 0.567      | 0.472      | 0.376     | 5                |
| M6         | 0.477 | 0.162 | 0.478     | 0.468      | 0.459      | 0.449      | 0.438     | 4                |
| M7         | 0.557 | 0.167 | 0.522     | 0.614      | 0.705      | 0.797      | 0.888     | 7                |
| M8         | 0.399 | 0.162 | 0.478     | 0.359      | 0.239      | 0.120      | 0.000     | 2                |
| M9         | 0.419 | 0.107 | 0.000     | 0.028      | 0.056      | 0.084      | 0.112     | 1                |
| M10        | 0.562 | 0.156 | 0.426     | 0.548      | 0.671      | 0.793      | 0.916     | 6                |

VİKOR yönteminde elde edilen sıralamanın geçerli ve güvenilir bir "uzlaşık çözüm" olarak kabul edilebilmesi için iki temel koşul aynı anda sağlanıyor olmalıdır.

Aşağıda, uzlaşmacı  $v = 0.50$  senaryosu üzerinden bu iki koşulun hesaplaması ve değerlendirmesi yer almaktadır.

#### **Koşul 1: Kabul Edilebilir Avantaj**

Bu koşul, en iyi alternatif ile ikinci en iyi alternatif arasında karar vericiyi tatmin edecek kadar belirgin bir fark olup olmadığını ölçer.

$$Q(A2) - Q(A1) \geq DQ$$

$$DQ (\text{Eşik Değeri}) = 1 / (m - 1) \text{ (Burada m alternatif sayısıdır).}$$

Sıralamada birinci (A1): M9 ( $Q1 = 0.056$ )

Sıralamada ikinci (A2): M8 ( $Q2 = 0.239$ )

Alternatif Sayısı (m): 10

$$DQ = 1 / (10 - 1) = 0.111$$

$$Q2 - Q1 = 0.239 - 0.056 = 0.183$$

$0.183 \geq 0.111$  olduğu için Koşul 1 sağlanmıştır. Bu da elde edilen sonucun matematiksel olarak güvenilir olduğunu açıklamaktadır.

#### **Koşul 2: Kabul Edilebilir İstikrar**

Bu koşul, en iyi seçeneğin (M9) karar verme sürecindeki diğer ölçütler olan grup faydası (S) veya bireysel pişmanlık (R) açısından da istikrarlı olup olmadığını kontrol eder.

En iyi alternatif (A1), S ve/veya R değerlerine göre yapılan sıralamalarda da en iyi puana sahip olmalıdır.

M9 makinesi,  $R_i$  (Bireysel Pışmanlık) değerine göre yapılan sıralamada 0.107 puanı ile tüm alternatifler arasında birinci sıradadır.  $S_i$  (Grup Faydası) değerine göre yapılan sıralamada ise M8'in (0.399) ardından 0.419 puanı ile ikinci sıradadır. Sonuç: M9 makinesi R değerine göre birinci sırada yer aldığı için Koşul 2 sağlanmıştır.

M9 makinesi,  $v=0.0$  ile  $v=0.75$  arasındaki tüm stratejik yaklaşımlarda en düşük Q değerine sahip olarak en çok tercih edilecek seçenek olmaktadır. Bu, makinenin hem bireysel kriterlerdeki riskler açısından hem de genel verimlilik açısından "istikrarlı" bir seçim olduğunu kanıtlar.

Sadece "Grup Faydası" ( $v=1$ ) hedeflendiğinde M8 makinesi birinciliğe yükselmektedir. Bu durum, M8'in toplam ağırlıklı puanlarda en iyi olduğunu ancak M9 kadar dengeli (riskleri dağıtan) bir yapıda olmadığını gösterir.

Bununla birlikte M2 ve M3 makineleri, tüm senaryolarda yaklaşık  $Q=0.80$  ve üzeri değerler alarak gemi inşa projesi için uygun olmayan seçenekler olarak sınıflandırılmıştır.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Gemi makinesi seçimi, geminin dizayn ve mühendislik hesaplamaları sürecinde kritik bir rol oynamaktadır. Gemi makinesi, geminin stabilitesi, mukavemeti, izolasyonu, ses ve titreşim gibi birçok parametreyi doğrudan etkileyen bir unsurdur. Bu nedenle, gemi makinesinin seçimi aslında bir optimizasyon süreci olarak değerlendirilebilir. Bu süreçte, çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemlerinden yararlanmak, güvenilirlik ve rasyonellik açısından oldukça doğru bir yaklaşım sunmaktadır. Ancak, burada asıl önemli olan, kriterlerin titizlikle belirlenmesi ve bu kriterlere ait değerlerin gerçekçi, önceki tecrübelerden elde edilen verilere dayanarak ya da bilimsel yöntemlerle elde edilmiş olmasıdır.

Bu çalışma, gemi inşa endüstrisinde kritik öneme sahip olan ana makine seçim sürecini, çok kriterli bir perspektifle ele almıştır. Literatürde belirtildiği üzere, makine seçimi yalnızca bir güç ünitesi tercihi değil; yakıt ekonomisi, bakım işçiliği, fiziksel boyutlar ve titreşim gibi birbiriyle çelişen kriterlerin yönetilmesidir.

Çalışmada kullanılan VİKOR yöntemi, "maksimum grup faydası" ve "minimum bireysel pışmanlık" ilkelerini dengeleyerek, diğer yöntemlere kıyasla daha esnek ve risk odaklı bir çözüm sunmuştur. Özellikle yapılan duyarlılık analizi, karar vericinin stratejik eğilimi (riskten kaçınma veya verimlilik odaklılık) değişse bile sonuçların ne kadar kararlı olduğunu bilimsel olarak kanıtlamıştır.

Bu makalede sunulan uygulama çerçevesinde, Tablo 6'da da görüldüğü üzere, karar problemine yönelik en uygun makine olarak M9 CATERPILLAR M 43 makinesi seçilmiş ve belirlenen kriterler doğrultusunda uygun bulunmuştur.

## KAYNAKÇA

- Baihaqi, I., Lazakis, I., & Supomo, H. (2023). Integrated Value Engineering and risk assessment performance measurement framework in ship-manufacturing industry towards net zero emissions using fuzzy DEMATEL-AHP. *Machines*, 11(8), 799.
- Balbaş, O., & Turan, E. (2019). Tersanelerde inşa edilecek gemi tipinin belirlenmesinde bulanık AHP ve bulanık TOPSIS yöntemlerinin uygulanması. *Gemi ve Deniz Teknolojisi*, (215), 93-111.
- Chen, C., Zhang, X., Wang, G., Feng, F., Sun, C., & He, Q. (2023). A hybrid multi-criteria decision-making framework for ship-equipment suitability evaluation using improved ISM, AHP, and Fuzzy TOPSIS methods. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(3), 607.
- Ertuğrul, İ., & Karakaşoğlu, N. (2009). Banka şube performanslarının vikor yöntemi ile değerlendirilmesi. *Endüstri Mühendisliği Dergisi*.
- Güllü, E. (2019). Türkiye bankacılık sistemindeki yabancı sermayeli mevduat bankalarının risk derecelendirilmesi: camels tabanlı vikor modeli uygulaması. Yüksek lisans tezi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi. Sosyal Bilimler Enstitüsü, Zonguldak.
- Gürgen, S., & Altın, İ. (2023). Assessing Key Factors in Marine Main Engine Selection using Fuzzy AHP Method. *Mersin Üniversitesi Denizcilik ve Lojistik Araştırmaları Dergisi*, 5(1), 57-79.
- Kasap, S. S., Şahin, Y., & Çınar, T. (2020). Bulanık Tabanlı Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri ile Demirçelik Endüstrisinde En Uygun Yatırım Seçeneğinin Belirlenmesi. *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 31, 59.
- Kuo, M. S., & Liang, G. S. (2012). A soft computing method of performance evaluation with MCDM based on interval-valued fuzzy numbers. *Applied Soft Computing*, 12(1), 476-485.
- Opricovic, S. & Tzeng, G.H. (2004). Compromise solution by MCDM Methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156, 445-455. doi: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1)
- Opricovic, S. & Tzeng, G.H. (2007). Extended VIKOR method in comparison with other outranking methods. *European Journal of Operational Research*, 178, 514-529. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.01.020>
- Paksoy, S. (2017). Çok Kriterli Karar Vermede Güncel Yaklaşımlar. Adana: Karahan Kitabevi.
- Şahin, Y., & Bozkurt, Y. (2021). Multi-criteria decision support with SWARA and TOPSIS methods to the digital transformation process in the iron and steel industry. In *Digitizing Production Systems: Selected Papers from ISPR2021, October 07-09, 2021 Online, Turkey* (pp. 309-322). Cham: Springer International Publishing.
- Tamer, S., Barlas, B., & Günbeyaz, S. A. (2021). Çok kriterli karar verme yöntemlerinin gemi inşaatı ve gemi makineleri mühendisliğinde uygulamaları. *Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi*, 220
- Tzeng, G. H., & Huang, J. J. (2011). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*.
- Ünal, F. (2019). Öğrenci ve personel taşımacılığı firmasında, bulanık vikor yöntemi kullanarak taşıeron seçimi ve bir uygulama. Yüksek lisans tezi, Beykent Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

Vincent, S., Kiran, M., Ambaliya, H., Sharma, V., Kumar, D., Whawal, R., ... & Kumar, S. (2024, March). Novel Approaches to Shipyard Layout Management: An Overview. In *International Conference on Sensors and Microsystems* (pp. 55-65). Singapore: Springer Nature Singapore.

Yaraş, S. (1999). Gemi Ana Makine Seçiminde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinin Uygulanması. 1999. Yüksek Lisans Tezi, İ.T. Ü Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yazır, D. (2023). A survey on MCDM approaches for maritime problems. *Mersin Üniversitesi Denizcilik ve Lojistik Araştırmaları Dergisi*, 5(1), 1-37.

<https://www.man-es.com>

<https://www.wartsila.com/marine/products/engines-and-generating-sets>

<https://www.hyundai-engine.com/en/marine/overview>

[https://www.cat.com/en\\_US/products/new/power-systems/marine-power-systems.html](https://www.cat.com/en_US/products/new/power-systems/marine-power-systems.html)





# Bölüm 13

## OLAY YERİ GÖRÜNTÜLEMEDE DİJİTAL DÖNÜŞÜM: FOTOGRAMETRİDEN LİDARA MEKANSAL VE SPEKTRAL SENTEZ

*Burak YEDEKÇİ<sup>1</sup>, Özlem DEMİRCAN<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Dr., Bağımsız Araştırmacı, 0000-0002-2009-8100

<sup>2</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, GSF, Fotoğraf Bölümü, 0000-0002-3041-7160

## 1- Giriş

Adli Bilimler (*forensic*) disiplini, maddi gerçeğe ulaşma süreçlerinde kanıtların keşfi, dokümantasyonu ve incelenmesi evrelerinde kapsamlı bir metodolojik dönüşüm geçirmektedir. Olay yerlerinin artan karmaşıklığı ve yargı mekanizmalarının delil güvenilirliği konusunda talep ettiği yüksek hassasiyet standartları, konvansiyonel belgeleme/görüntüleme yöntemlerinin yetersiz kaldığı noktaları daha net bir biçimde göstermektedir. Geleneksel yöntemler olan manuel ölçümler, şematik krokiler ve fotoğraf çekimleri, karmaşık olay yerlerinin mekânsal derinliğini, nesnelere arası konumsal ilişkileri ve mikroskobik düzeydeki delil kalıntılarını yeterli doğrulukla belgeleyememektedir. Mekânsal doğruluk ve ayrıntı düzeyi bakımından belirginleşen bu sınırlılıklar, delil kontaminasyonu riskini ve soruşturma sürecindeki telafi edilemez veri kayıpları olasılığını artırmaktadır.

Dolayısıyla mevcut literatür, geleneksel yöntemlerin subjektif hatalara açık olduğunu ve olay yerinin dijital bir ikizinin (*digital twin*) oluşturulması noktasında zayıf kaldığını göstermektedir. Olay yerinin üç boyutlu koordinat sistemi içerisinde metrik hassasiyetle sabitlenmesi, gizli (*latent*) izlerin spektral yöntemlerle belgelenmesi ve toplanan verilerin analitik bir disiplinle çözümlenmesini sağlayan bu teknolojik entegrasyon; güncel adli süreçlerde stratejik bir bilimsel gereklilik teşkil etmektedir. Ancak, bu ileri teknolojilerin adli uygulamalardaki kullanılabilirlik parametreleri, saha koşullarına duyarlılıkları ve doğruluk değerlendirme pratikleri literatürde homojen bir standardizasyon düzeyine erişmemiş görünmektedir. Üreticiye göre değişen hata payı kalibrasyonları, çevresel etmenlerin veri geçerliliğine etkisi ve yöntemlerin farklı değerlendirme tasarımlarıyla sınanması, bu alandaki akademik tartışmanın sürdüğüne işaret etmektedir (Esposito vd., 2023; Maneli ve Isafiade, 2022).

Ayrıca, yüksek çözünürlüklü sensörler ve tarayıcılarla elde edilen veri yığınlarının (*big data*) nasıl işleneceği, güvenliğinin nasıl sağlanacağı ve anlamlı suç örüntülerine nasıl dönüştürüleceği de çözüm bekleyen temel problemler arasında yer almaktadır.

Olay yeri inceleme disiplininde dijital dönüşümün sınırlarını belirleyen teknolojik bileşenler, literatürde birbirini besleyen metodolojik bir akış içerisinde konumlandırılmaktadır. Bu inceleme kapsamında, geniş coğrafi alanların haritalandırılmasında ve topografik 3D modellerin oluşturulmasında yüksek perspektif avantajı sağlayan İHA (İnsansız Hava Aracı-Drone) destekli fotogrametri yöntemleri ve sahneyi milimetrik hassasiyetle dijitalleştiren LIDAR (*Light Detection and Ranging*) sistemleri, mekânsal verinin inşasındaki temel dayanaklar olarak değerlendirilmektedir. İncelemenin odağındaki görsel tespit kapasitesi; insan gözünün duyarlılık eşiğini aşan hiperspektral (*HSI*), morötesi (*UV*) ve kızılötesi (*IR*) dalga boyu analizleri ile termal görüntüleme teknolojilerinin sağladığı spektral derinlik üzerinden tartışılmaktadır.

Literatürdeki veriler, bu farklı sistemlerle toplanan yüksek hacimli ve heterojen verilerin adli analiz sürecine dahil edilmesinin olay yerlerinin hem mekânsal hem de spektral katmanlar bazında bütüncül bir yaklaşımla incelenmesinde belirleyici bir rol üstlendiğini göstermektedir. Geleneksel belgeleme yöntemlerinin fiziksel ve optik sınırlarını aşmayı hedefleyen bu dijital iş akışı, delillerin sahadaki konumsal verileriyle moleküler düzeydeki niteliklerini aynı analitik düzlemde buluşturmaktadır.

Bu çerçevede elde edilen dijital modeller ve spektral analizler, olay yeri inceleme ekiplerinin olay akışını milimetrik doğrulukla ve yüksek çözünürlükte takip etmesini sağlayarak, soruşturma ve kovuşturma aşamasında karar verme süreçlerine doğrudan teknik veri desteği sunmaktadır. Bu

araştırma; bahsi geçen üç boyutlu dokümantasyon ve uzaktan algılama teknolojilerinin münferit operasyonel yetkinliklerinden ziyade, bir araya geldiklerinde oluşturdukları yüksek hassasiyetli, ölçülebilir ve tahribatsız yeni nesil adli belgeleme sistemini bütünlük bir perspektifle değerlendirmeyi ve sentezlemeyi hedeflemektedir.

## 2. Üç Boyutlu Dokümantasyon Sistemleri

### 2.1. İHA tabanlı fotogrametri

Olay yeri dokümantasyon süreçleri, son on yıllık periyotta görsel yapısal bir dönüşüm sergilemiştir. Geleneksel dijital fotoğraflama ve manuel ölçüm araçları, standart operasyonel süreçlerde temel belgeleme gereksinimlerini karşılamakla birlikte, karmaşık mekânsal korelasyonların çözümlenmesi gereken senaryolarda derinlik kaybı, perspektif distorsiyonu ve ölçeklendirme hataları gibi yapısal sınırlılıklarla karşı karşıya kalmaktadır.

Bu kapsamda *fotogrametri* tekniği, olay yerini matematiksel bir koordinat düzlemine taşıyarak, sahanın fiziksel özelliklerinin dijital olarak sabitlendiği bir veri muhafaza kabiliyeti sunmaktadır.

Fotogrametri, iki boyutlu fotoğraflardan üç boyutlu koordinatlar türeten bir matematiksel çıkarım sürecidir. Nesnenin ya da mekânın farklı açılardan çekilmiş onlarca, hatta yüzlerce fotoğrafı, gelişmiş algoritmalar tarafından otomatik olarak eşleştirilerek ve ortak noktalar belirlenerek bu noktaların uzaydaki konumlarının hesaplanmasına dayanmaktadır. *Pix4D*, *Agisoft Metashape* gibi endüstri standardı yazılımlar, bu işlemi operatörün teknik müdahalesiyle gerçekleştirerek ortaya yoğun nokta bulutları (*dense point clouds*), üç boyutlu modeller ve fotorealistik dokular çıkarmaktadır. Sonuçta elde edilen dijital model, sanal gerçeklik gözlükleriyle içerisinde gezinilebilir hale gelebilmekte veya mahkemede interaktif bir olay yeri olarak sunulabilmektedir.

İnsansız Hava Araçları, fotogrametrinin sağladığı bu boyutsal kapasiteyi hava tabanlı sensör perspektifiyle birleştirerek, geniş coğrafi ve erişimi güç sahalarda operasyonel veri toplama avantajı sunmaktadır. Özellikle yangın sonrası yapısal bütünlüğü bozulmuş binaların iç geometrisi, geniş alana yayılmış kentsel felaketler veya topografik olarak zorlu arazilerdeki uçak kaza kırım sahnelerinin dokümantasyonu, İHA sistemleri sayesinde olay yeri personelinin fiziksel risklerden arındırarak, yüksek çözünürlüklü veri üretimine olanak tanımaktadır. Bu teknolojik entegrasyon, karmaşık sahnelerin geleneksel yöntemlere kıyasla daha hızlı ve veritabanı bütünlüğü korunmuş biçimde modellenmesini sağlamaktadır.

Fotogrametrik sistemlerin sunduğu uzamsal belgeleme kapasitesi, Kan Lekesi Model Analizi (*Bloodstain Pattern Analysis*) bağlamında olayın olası akışı ve olaya konu olan kişilerin konumlanmasına ilişkin çıkarımları desteklemektedir. Ayrıca eliptik leke geometrisinden etki açısının hesaplanması ve kan damlasının geldiği yön çizgilerinin geriye doğru uzatılması yoluyla köken bölgesinin belirlenmesi, bu yorumlamayı ölçülebilir bir çerçeveye taşımaktadır (Hołowko vd., 2016, ss. 4-7). Geleneksel 2D dokümantasyon tekniklerinden elde edilen yoruma dayalı tahminlerin aksine 3D rekonstrüksiyon süreçleri leke çapı, eliptik formasyon ve yüzey dokusu etkileşimi gibi fiziksel değişkenlerin sayısal verilere dönüştürülmesine olanak tanımaktadır. Söz konusu dijitalleştirme yaklaşımı, analizleri subjektif yargı kısıtlılıklarından uzaklaştırarak kanıtın nesnel, denetlenebilir ve matematiksel doğrulanabilirliği olan bir düzlemde değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır.

İHA tabanlı fotogrametrik modellerin konumsal hassasiyeti kullanılan sensörün çözünürlüğü, uçuş irtifasına bağlı olarak değişen yer örnekleme mesafesi, görüntü örtüşme oranları ve tercih edilen eşleme algoritmalarının veri işleme kapasitesiyle doğrudan ilişkilidir. Kontrollü saha çalışmalarına dayanan literatür bulguları, fotogrametrik üretimlerin 2,6 mm ile 33,2 mm arasında değişen hata payları sergileyebildiğini rapor etmektedir (Galanakis vd., 2021, s. 58). Mevcut hata marjları metodolojinin güvenilirliğini gölgelemekten ziyade, boyutsal toleransların uygulama türüne ve olay yeri karakteristiklerine göre rasyonel bir biçimde tanımlanması gerektiğini vurgulamaktadır. Yüksek işlem hızı, düşük donanım maliyeti ve operasyonel esneklik parametreleri bütünleşik olarak değerlendirildiğinde fotogrametri, geniş ölçekli adli dokümantasyon süreçlerinde stratejik bir verimlilik sunmaktadır. Özellikle zaman baskısı altındaki olay yeri müdahalelerinde, geniş sahaların 3D dijital ikizlerinin kısa süre içerisinde oluşturulabilmesi, yöntemi operasyonel sürdürülebilirlik açısından belirleyici bir konuma taşımaktadır.

Pasif bir görüntüleme disiplini olan fotogrametri, doğrudan ışık-nesne etkileşimine dayanması nedeniyle çeşitli çevresel ve optik hassasiyetlere sahiptir. Yanı sıra aydınlatma yetersizliği, geniş diyafram açıklığına bağlı netlik derinliği kayıpları, lens parlaması (*flare*) ve yağış veya sis gibi meteorolojik etkenler, görüntü kalitesini deforme ederek algoritmaların öznetelik eşleştirme başarısını düşürebilmektedir. Özellikle tekdüze (homojen) dokulu yüzeyler-pürüzsüz duvarlar veya düz zeminler- görüntü işleme yazılımlarının ayırt edici referans noktaları tanımlamasını engellemekte; bu durum dijital modellerde topolojik süreksizliklere veya boyutsal deformasyonlara yol açmaktadır. Söz konusu metodolojik sınırlılıkları dengelemek amacıyla, operasyonel süreçte ışıklandırma koşullarının optimizasyonu veya sahaya yüksek kontrastlı kodlanmış işaretleyicilerin yerleştirilmesi gibi standart veri toplama prosedürlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Teknik kısıtlara ek olarak, hava sahası düzenlemeleri, bürokratik izin prosedürleri ve veri mahremiyetine ilişkin yasal normlar, hızlı müdahale gerektiren adli senaryolarda operasyonel esnekliği kısıtlayan dışsal parametrelerdir.

İHA destekli fotogrametrinin teknolojik projeksiyonu, otonom uçuş algoritmaları, gerçek zamanlı veri işleme çözümleri ve yapay zekâ temelli nesne tanımlama mimarilerinin bütünleşmesine odaklanmaktadır. Georgiou ve arkadaşları tarafından 2022 yılında yürütülen deneysel bir çalışma, İHA video akışları üzerinde görüntü işleme algoritmaları kullanılarak mikro ölçekli bulguların otomatik saptanmasının, yüksek doğrulukla, mümkün olduğunu göstermiştir. Çalışmada, bu analizler kaydedilmiş videolar üzerinde gerçekleştirilse de araştırmacılar bu tür analitik algoritmaların doğrudan uçuş yönetim sistemlerine entegre edilmesini, olay yerinde eş zamanlı veri işleme ve erken tespit kapasitesi açısından önemli bir gelecek hedefi olarak işaret etmektedir (Georgiou vd., 2022, s. 1228). Bu teknolojik dönüşüm, uzmanların sahada veri toplarken aynı anda kritik ipuçlarından haberdar olmasını, kaynak dağılımını optimize etmesini ve genel soruşturma süreçlerini hızlandırmasını sağlayacak potansiyeldedir.

## **2.2. LIDAR Teknolojisi: Aktif sensörlerle hassas 3D haritalama**

Olay yeri incelemelerinde dijital belgeleme süreçlerinin güvenilirliği, temelde mekânsal doğruluğun ne ölçüde sağlanabildiği sorunsalıyla ilişkilidir. Önceki bölümde ele alınan fotogrametri teknikleri çevresel ışık koşullarına bağımlı pasif bir yöntem olarak işlev görürken, *LIDAR teknolojisi* aktif bir uzaktan algılama sistemi olarak kendi lazer enerji kaynağını kullanmaktadır. Bu yaklaşım, manuel ölçüm tekniklerinin sınırlılıklarını ve perspektife dayalı fotografik yöntemlerin lens seçiminden kaynaklı geometrik hatalarını gidererek, olay yerini zaman-ölçümü temelli LIDAR sistemlerinin sağladığı 3-8 mm doğruluk aralığında (Wen vd., 2013, s. 32) dijital olarak sabitlemektedir

Böylece, olay yeri zamanla bozulsa veya yok olsa bile, dijital kopyası üzerinde yıllar sonra bile milimetrik inceleme yapma olanağı sağlanmaktadır. Adli belgeleme süreçlerinde LIDAR teknolojisinin sunduğu bir diğer avantaj, aktif bir sensör mimarisine sahip olması sebebiyle harici ışık kaynaklarına olan mutlak bağımlılığı elimine etmesidir. Fotogrametri gibi pasif görüntüleme tekniklerinin veri toplama kabiliyetini yitirdiği zifiri karanlık iç mekanlar, düşük ışıklı mahzenler veya gece saatlerinde gerçekleşen trafik kazaları, LIDAR sistemlerinin kesintisiz ve yüksek hassasiyetle veri üretebildiği operasyonel senaryolardır.

LIDAR teknolojisinin adli operasyonlarda konumlandırılması, saha ölçeği ile hedeflenen ölçüm doğruluğu arasında kurulan ilişki üzerinden yersel (*terrestrial*) ve havadan (*aerial*) tarama olmak üzere iki ana yaklaşım altında toplanmaktadır. Bu çerçevede yersel lazer tarama, kapalı alanların üç boyutlu temsili ve milimetre düzeyinde kayıt gereksinimi bulunan senaryolarda öne çıkmaktadır. Yersel sistemler, olay yerinin tamamının milimetre hassasiyetle kaydedilmesine imkân tanımakla birlikte, üç boyutlu uzam içinde mermi yörüngelerinin ölçümü ile kan lekesi kanıtının haritalanması gibi uygulamalara analitik bir zemin sağlamaktadır. Bina içi incelemeler ve araç içi gibi karmaşık geometrilerin ölçülebilir bir koordinat yapısı içinde yeniden kurulması, bu milimetrik modelleme kapasitesinin doğrudan bir uzantısıdır (Raneri, 2018, ss. 699, 701)

İHA'lara entegre edilen havadan LIDAR sistemleri ise, geniş ölçekli arazilerde ve optik görüşün kısıtlandığı bitki örtüsünün yoğun olduğu sahalarda önemli bir metodolojik üstünlük sağlamaktadır. Lazer ışınlarının vejetasyon penetrasyonu yeteneği, ışınların yoğun bitki örtüsü ve ağaç taç katmanının arasından geçerek zemine ulaşmasına ve buradaki yüzey detaylarının kaydedilmesine olanak tanımaktadır.

Modern havadan LIDAR tarayıcı sistemleri yüzey morfolojisindeki ince topografik değişimleri yüksek çözünürlükte tespit edebilme yeteneğine sahiptir. Bu yöntem, adli bilimlere ve olay yeri inceleme süreçlerinde, gizli mezar alanlarının lokalizasyonu, arazi üzerindeki hafif eğim farklılıklarının tespiti ve ormanlık alanlarda bitki örtüsünü geçerek alt yüzeyin üç boyutlu olarak haritalanması gibi uygulamalarda, yüzey verisinin ayrıntılı biçimde gözlenmesini desteklemektedir (Berezowski vd., 2022, ss. 7-9)

LIDAR sistemlerinin pasif ışık kaynaklarına bağımlı olmadan çalışabilmesi, çevresel aydınlatma eksikliği ya da görüş engelleyici atmosferik koşullar altında dahi yüksek konumsal doğrulukta mekânsal veri elde edilmesini sağlamaktadır (Berezowski vd., 2022).

LIDAR taramalarının sağladığı yüksek doğruluk ve hızlı veri toplama avantajlarına karşın sis, duman ve nem gibi atmosferik engeller, lazer ışınının saçılmasına ve sinyal geri dönüşünün zayıflamasına yol açarak mekânsal ölçüm hassasiyetini düşürebilmektedir. Bu tür koşullarda yüksek gürültü (*noise*) seviyesi ve düşük sinyal-gürültü oranı ile çalışmak zorunlu hale geldiğinden, nokta bulutu verilerinin işlenmesinde gelişmiş gürültü filtreleme ve veri analiz algoritmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Jiang ve arkadaşları (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, foton-verimli görüntüleme algoritmaları ve kapsamlı gürültü bastırma teknikleri uygulanarak düşük görünürlük koşullarında (görüş mesafesi < 4 km) 13,4 km mesafeden hassas üç boyutlu modelleme başarılmış; bu sonuçlar LIDAR sistemlerinin atmosferik engelleyiciler altındaki performans sınırlılıklarının önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermektedir (Jiang vd., 2023, ss. 16058-16059).

Olay yeri incelemelerinde LIDAR sistemlerinin yaygın kullanımını sınırlayan başlıca etkenler arasında yüksek maliyet ve sınırlı taşınabilirlik öne çıkmaktadır. Bu sınırlamaların aşılması amacıyla geliştirilen mobil LIDAR sensörleri, düşük donanım maliyeti ve yüksek veri üretim hızı sayesinde sahaya taşınabilir çözümler sunmaktadır. Örneğin, *iPhone 13 Pro* cihazına entegre edilen LIDAR sensörü ve *Recon-3D* uygulamasıyla gerçekleştirilen çalışmada, olay yeri senaryolarının ortalama iki dakikanın altında tamamlanabildiği 0,22 cm ile 0,18 mutlak hata payı ile ölçüm yapılabildiği raporlanmıştır. Bununla birlikte yansıtıcı yüzeyler, cam gibi şeffaf materyaller ve koyu renkli objeler, mobil LIDAR sistemleriyle üretilen nokta bulutu verisinde boşluklara ve renk artefaktlarına yol açabilmektedir (Kottner vd., 2023, s. 4). Mobil LIDAR sistemlerinin adli uygulamalardaki doğruluk, tekrarlanabilirlik ve çevresel değişkenlere karşı dayanıklılık düzeylerini artırmak için cihazlara özgü kalibrasyon protokollerinin tanımlanması ve hata toleransını azaltan gelişmiş veri işleme algoritmalarının geliştirilmesi gerekmektedir.

### 3. Hiperspektral (HSI), Ultraviyole (UV) ve Kızılötesi (IR) Görüntüleme ile Görünmez Delil Tespiti

Olay yeri incelemelerinde düşük spektral kontrasta sahip latent delillerin tespiti, adli bilimler açısından çözüm gerektiren temel bir teknik sınırlılık olarak öne çıkmaktadır. Geleneksel görüntüleme sistemleri, biyolojik izler ve mikroskobik kimyasal kalıntılar gibi makroskobik inceleme ile yakalanamayan bulguların ortaya çıkarılmasında sınırlı duyarlılık gösterebilmektedir. Bu bağlamda hiperspektral görüntüleme, her piksel için çok bantlı spektral bilgi üreten ve VIS/NIR (Visible / Near-Infrared) alanında görünür (400-700 nm) ile yakın kızılötesi (700-1000 nm) bantlarını ayrı ayrı ele alabilen kamera mimarileri üzerinden tartışılmaktadır (Tisserand, 2021, s. 63). Latent delillerin tahribatsız biçimde görünürleştirilmesi ise UV/ALS (Ultraviolet / Alternate Light Sources) ve IR tabanlı yaklaşımlarda, arka plan ile delil arasında oluşan spektral absorpsiyon–yansıma kontrastına dayanmakta ve bu kontrast, görselleştirme için zorunlu bir koşul olarak ifade edilmektedir (Lin vd., 2007, s. 1148). Elektromanyetik spektrumun farklı bölgelerini hedefleyen bu yöntemler, tek başına evrensel bir çözüm olmaktan ziyade, delilin türüne ve yüzey özelliklerine bağlı olarak birbirini tamamlayan veri katmanları üretmektedir.

#### 3.1 Hiperspektral görüntüleme (HSI)

HSI, madde ile ışığın farklı dalga boylarındaki etkileşimini eşzamanlı ölçerek hem mekânsal hem de spektral düzeyde yüksek çözünürlüklü veri üreten ileri düzey bir teknolojidir. Sistem konfigürasyonuna bağlı olarak UV, görünür (VIS), yakın kızılötesi (NIR) ve orta dalga kızılötesi (Mid-IR) bantlarını kapsayabilen HSI uygulamaları, iz delillerinin non-invaziv ve detaylı analizinde giderek daha yaygın kullanılmaktadır. Literatürde yer alan kan lekelerine ilişkin spektral temelli depozisyon zamanı kestirimi (Edelman vd., 2012), vücut sıvısı ayırımı (Malegori vd., 2020) ve patlayıcı tespiti bağlamındaki hiperspektral yaklaşım değerlendirmeleri (Yüksel vd., 2021) bulguları; HSI teknolojisinin görsel veriyi spektral imzalarla birleştirerek sınıflandırma ve analitik ayrıştırma için bir yöntem zemini sunduğunu ortaya koymaktadır.

Standart dijital kameralar çoğunlukla RGB (*Red, Green, Blue*) kanallarıyla sınırlı veri üretirken, hiperspektral kameralar teknolojiye bağlı olarak yüzlerce banda uzanan spektral örnekleme yapıları üzerinden ayrılmaktadır (Tisserand, 2021, s. 59). Bu çerçevede yöntem, bir izin varlığını işaret etmeye ek olarak, izlerin olası kaynağına dönük ayrıştırma girişimlerine analitik bir zemin sunabilmektedir. Bununla birlikte HSI çıktılarının adli bağlamda savunulabilirliği, sensör

konfigürasyonunun tanımlanması, kalibrasyon akışının raporlanması, sınıflandırma yaklaşımının gerekçelendirilmesi ve doğrulama protokollerinin şeffaf biçimde belirtilmesi üzerinden kurulmaktadır. Bu bileşenlerin raporlanma düzeyi zayıfladığında yöntem, yüksek hacimli veri üreten ancak yorum tutarlılığı bağlama göre değişen bir araca dönüşme riski taşımaktadır.

### 3.2. UV görüntüleme

UV görüntüleme, olay yerinde çıplak gözle ayırt edilemeyen biyolojik sıvılar (semen, idrar vb.) ve belirli kimyasal kalıntıların (ilaç artıkları, mürekkep) görünür hâle getirilmesinde yaygın biçimde uygulanan bir adli görselleştirme tekniğidir. Farklı dalga boylarında çalışan UV ışık kaynakları, bazı vücut sıvılarında karakteristik floresans yanıtlar üreterek tespit sürecini hızlandırmaktadır. Literatürde 430-470 nm aralığındaki mavi ışık altında semen lekelerinin belirgin floresans verebildiği, 415-490 nm bandında ise tükürük ve vajinal sıvının görünür hâle geldiği bildirilmektedir. Öte yandan ter lekelerinin düşük floresans verimi tespiti zorlaştırırken, kan UV altında floresans göstermemekle birlikte koyu renk kontrastı sayesinde dolaylı olarak belirlenebilmektedir (Finnis vd., 2023; Virkler ve Lednev, 2009).

Ne var ki sahada hızlı tarama ve ön değerlendirme açısından etkili olan UV görüntüleme, kimyasal bileşime ilişkin kapsamlı analitik bilgi üretme konusunda yetersizdir. UV altında bir lekenin varlığı doğrulanabilir olsa da lekenin protein veya moleküler bileşenleri ya da kaynağı bu aşamada güvenilir biçimde belirlenmemektedir. Bu bağlamda HSI'nin geniş bant aralığı ve piksel düzeyinde spektral profil üretme kapasitesi, yalnızca görünürlüğü artırmakla kalmayıp biyolojik kalıntıların moleküler bileşime dayalı ayrıştırılmasına daha yüksek duyarlılıkla katkı sunabilmektedir (Malegori vd., 2020).

UV kullanımının göz ardı edilmemesi gereken bir sınırlılığı ise biyolojik örneklerde DNA bütünlüğü üzerinde yaratabileceği etkidir. Kontrollü UV maruziyetinin adli örneklerde DNA'nın yapısal bütünlüğünü bozarak STR tabanlı analizlerin doğruluğunu zayıflattığı bilinmektedir. Yapılan çalışmalarda 15 saniyeyi aşan maruziyetlerde allelik kayıplar ve amplifikasyon verimliliğinde düşüşler gözlenmiş, 45-60 saniye aralığında bozulmanın belirginleştiği rapor edilmiştir. Düşük DNA miktarına sahip örneklerde bu etkiler daha erken aşamalarda belirirken, maruziyet süresi uzadıkça segment kaybı artmakta ve geri kazanım oranı düşmektedir (Cabral De Almada vd., 2024, ss. 24-25). Dolayısıyla UV, sahada hızlı yönlendirme açısından değerli olmakla birlikte olası genetik analiz hedefi gözetilerek düşük yoğunluklu kaynaklar ve sınırlı maruziyet süreleriyle kullanılmalıdır. Bu riskin daha az belirgin olduğu tahribatsız optik yaklaşımlar (HSI ve belirli IR uygulamaları) biyolojik deliller açısından güvenli alternatifler olarak değerlendirilebilir.

### 3.3. IR görüntüleme

IR görüntüleme, yüzey ile biyolojik/fiziksel deliller arasındaki yansıma ve absorpsiyon farklarını kullanarak çıplak gözle ayırt edilemeyen izlerin optik olarak görünür kılınmasını sağlamaktadır. Kan lekeleri, ateşli silah artıkları, lif izleri ve yanmış belgeler gibi düşük kontrastlı adli izlerin saptanmasında IR'nin etkili bir yöntem olduğu belirtilmektedir (Lin vd., 2007). IR spektrumu genel olarak yakın (NIR), orta (MIR) ve uzak (FIR) bantlara ayrılmakta, adli uygulamalarda seçilen bant, yüzey/iz etkileşimine ve hedeflenen bulgunun optik özelliklerine göre belirlenmektedir (Ozaki, 2021, s. 2). Bu süreçte biyolojik kalıntıların yüzeyle etkileşiminden kaynaklanan soğurma ve yansıtma farklılıkları spektral düzeyde görüntülenerek, görünür spektrumda ayırt edilemeyen izler arasında kontrast oluşturulmaktadır.

IR'nin performansı yüzeyin yansıtıcılığı, doku morfolojisi ve materyalin kimyasal bileşimine göre değişebilmektedir. Örneğin vinil, laminant ve koyu renkli kumaşlarda kan lekelerinin yüksek duyarlılıkla tespit edilebildiği, yün halı ve linolyum gibi farklı yüzeylerde ise yanlış negatif sonuç riskinin arttığı bildirilmiştir (Airlie vd., 2022, ss. 287-289). Bu nedenle IR tekniği, hiperspektral görüntüleme ve luminol gibi kimyasal yöntemlerle birlikte kullanıldığında daha güvenilir bir tespit/doğrulama hattı kurabilmektedir.

IR görüntüleme, biyolojik delillerin yanı sıra belge incelemelerinde de işlevseldir. Yanmış veya karbonlaşmış belgelerde mürekkep-kâğıt arasındaki optik/kimyasal farklılıkların değerlendirilmesi, görünür spektrumda kaybolan yazıların IR altında yeniden okunabilir hale gelmesini mümkün kılabilir. Karbon içerikli mürekkeplerin kızılötesi bantta sergilediği soğurma özellikleri, silinmiş, örtülmüş ya da görünürlüğünü yitirmiş metinlerin yeniden okunabilir hale getirilmesinde önemli bir analitik araç olarak değerlendirilmektedir (Huang vd., 2010). Görünür spektrumda benzer tona sahip olabilen, ancak kızılötesi spektrumda farklı geçirgenlik özellikleri sergileyen mürekkeplerin ayrıştırılabilmesi, el yazısı belgelerde basılı içerik ile el yazısı eklemeler arasında optik temelli karşılaştırmalı analiz yapılmasına olanak tanımaktadır (Schmid vd., 2022, ss. 1-2).

Bununla birlikte IR görüntülemenin güvenilirliği, yüzey dokusu, malzeme bileşimi ve ortam ışığı gibi çevresel değişkenlere duyarlıdır. Her ne kadar IR ışığının yüzey altı katmanlardan veri elde etme potansiyeli bulunsada penetrasyon derinliği yüzeyin fiziksel ve kimyasal özellikleriyle sınırlıdır; ayrıca düşük emisivite veya yüksek yansıtıcılığa sahip yüzeylerde sinyal zayıflaması görülebilmektedir (Asirdizer, Hekimoglu, ve Gumus, 2016, ss. 101-105).

### 3.4. Termal görüntüleme

Termal görüntüleme teknolojisi, nesnelerin sıcaklık farklılıklarını temassız ve tahribatsız biçimde görselleştiren gelişmiş bir algılama yöntemidir. Sistem, elektromanyetik spektrumun uzun dalga kızılötesi (LWIR, 8-14 µm) bandındaki radyasyon dağılımını ölçerek çalışmaktadır. Mutlak sıfır noktasının (0 K = -273,15 °C) üzerindeki tüm nesnelere termal radyasyon yaymakta olup bu radyasyon termal sensörler aracılığıyla ölçülebilir görsel veriye dönüştürülmektedir (Kesić ve Bjelovuk, 2019, ss. 2-3; Zheng vd., 2024, ss. 2-10)

Geleneksel optik kameraların aksine termal sistemler dış ışık kaynaklarından bağımsız biçimde çalışabilmektedir. Bu özellik sayesinde tam karanlık, yoğun sis veya duman gibi görüş mesafesini kısıtlayan zorlu çevresel koşullarda dahi sıcaklık anomalileri yüksek doğrulukla tespit edilebilmektedir. Kayıp şahısların canlı tespiti, saklanmış kişilerin bulunması ve biyolojik dekompozisyon süreçlerine ilişkin termal haritalandırmaların yapılmasında bu teknoloji, adli birimlere önemli bir operasyonel avantaj sağlamaktadır (Nigam, 2018, ss. 17-18).

Olay yeri incelemelerinde termal görüntülemenin öne çıkan uygulamalarından biri zaman faktörüyle ilişkili termal kalıntıların tespitidir. Nesnelerin yakın zamandaki kullanım durumları veya bir şüphelinin mekânda bulunduğu süreye dair çıkarımlar termal soğuma eğrileri analiz edilerek yapılabilmektedir. Yakın zamanda ateşlenmiş bir silahın namlusu veya silahı kullanan kişinin temas ettiği yüzeyler, ortam sıcaklığıyla dengelenene kadar tespit edilebilir bir ısı izi oluşturmaktadır. Benzer şekilde olay yerindeki zemine basılmasından kaynaklanan ısı transferi, ayakkabı tabanının termal izlerini geçici olarak yüzeyde kaydetmektedir.



Yapılan araştırmalar, bu termal izlerin ortam koşullarına göre 3 ila 25 dakika arasında tespit edilebilir kaldığını ve bu verinin olayın kronolojisini yeniden yapılandırma için kullanılabileceğini göstermektedir. Nesnelerin yaklaşık 22°C-27°C bandındaki soğuma profillerinin modellenmesi, adli makamların şüpheli beyanlarını doğrulamasına veya maktulün hareketlerine dair kesin bir zaman çizelgesi oluşturmasına katkı sunmaktadır (Chua vd., 2018, ss. 1-8).

Termal teknolojinin bir diğer uygulama alanı adli entomoloji ve postmortem analizlerdir. Dekompozisyon sürecindeki bir beden sıcaklığı ortam sıcaklığına doğru düşerken, ceset üzerinde kolonize olan sinek larvalarının yoğun metabolik aktivitesi beklenmedik bir bölgesel ısı artışına neden olmaktadır. Larva kümelerinin ürettiği bu biyojenik ısı, çevre sıcaklığını 7-10°C, bazı durumlarda ise 25 dereceye kadar aşabilmektedir.

Hava araçlarından (helikopter vb.) veya insansız hava araçlarından (İHA) gerçekleştirilen taramalarda, larva kütlelerinin oluşturduğu bu ısı odakları; kadavranın kütlesine bağlı olarak yedi gün ile üç haftaya kadar saptanabilen belirgin ısı imzaları sunmaktadır. (Syed Mohd Daud vd., 2024, s. 551 Amendt vd., 2017). Lee ve arkadaşları (2018, s. 175) tarafından yapılan çalışmalarda bu termal etkinin kış aylarında 23 güne kadar, bazı durumlarda ise giysilerin varlığına rağmen aktif dekompozisyon süresince tespit edilebildiği raporlanmıştır. Bu bulgular, termal görüntülemenin erken postmortem dönemde ve ileri dekompozisyon evresindeki kalıntıların ve gizli mezarların tespitinde de güvenilir bir lokalizasyon aracı olduğunu ortaya koymaktadır.

Termal görüntülemenin doğruluk düzeyini etkileyen bazı teknik ve fiziksel sınırlılıklar mevcuttur. Sistemin temel parametresi emisivite (yayıcılık) katsayısıdır. Her malzeme ısıyı aynı oranda yaymamaktadır; parlak metaller düşük emisivite nedeniyle olduğundan daha soğuk görünürken, kumaş veya insan dokusu gibi organik yüzeyler daha sıcak algılanabilmektedir (Chaverot vd., 2023, s. 311; Nandhakumar ve Aggarwal, 1988, ss. 471-473). Ayrıca küçük boyutlu nesnelerin (mermi kovanı gibi) tespitinde sensör kaynaklı gürültüler ve düşük çözünürlük sorunları yaşanabilmektedir. Ayrıca uzak mesafedeki yaya ve araçlar gibi küçük boyutlu hedeflerin tespitinde; sensör kaynaklı düşük kontrast, bulanıklık ve düşük çözünürlük sorunları yaşanabilmektedir. Süper Çözünürlük (SR) algoritmaları bu konuda etkili sonuçlar sunarak, spesifik iyileştirme yöntemleriyle birlikte (MTH LIP gibi) küçük hedeflerin tespit başarısını yaklaşık %75 (AP50) düzeyine ulaştırabilmektedir (Chaverot vd., 2023, ss. 311-322). Bununla birlikte büyük ölçekli taramalarda söz konusu algoritmaların hesaplama maliyeti ve performans optimizasyonu hâlâ çözüm bekleyen sorunlar arasındadır.

Gelecekteki araştırmaların, çevresel faktörlere uyum sağlayabilen ve farklı yüzey materyallerini (metal, beton, organik doku) otomatik olarak sınıflandırabilen derin öğrenme tabanlı termal analiz yazılımlarının geliştirilmesine odaklanması önerilmektedir.

#### 4-Sonuç ve Öneriler

Olay yeri inceleme disiplini, dijital analiz yöntemlerinin sağladığı olanaklarla betimleyici bir kayıt sürecinden ölçülebilir ve doğrulanabilir bir bilimsel pratiğe evrilmiştir. Geleneksel fotografik yöntemlerin sağladığı durağan kayıtlar, yerini yeni nesil fotografik verilerin mekânsal ve spektral derinlikte bütünleştirildiği metrik doğruluğu yüksek dijital ikizlere bırakmaktadır. Bu metodolojik ilerleme, sahadan toplanan ham verilerden oluşan dijital ikizlerin mahkeme süreçlerinde nesnel ve denetlenebilir bilimsel kanıtlar olarak sunulabilmesi noktasında belirleyici bir aşamayı temsil etmektedir.

Bununla birlikte, çalışmada ele alınan teknolojilerin her olay yeri senaryosu için mutlak bir çözüm oluşturmadığı, yöntem seçiminin sahanın operasyonel gerekliliklerine ve delil karakteristiklerine göre belirlenmesi gerektiği göz önünde bulundurulmalıdır. Fotogrametri geniş alanların taranmasında operasyonel hız ve maliyet-etkinlik parametreleriyle avantaj sağlarken, LIDAR teknolojisi milimetrik hassasiyet gerektiren karmaşık geometrilere yüksek metrik tutarlılık sunmaktadır. Spektral yöntemlerin biyolojik ve kimyasal izlerin tahribatsız tespiti konusundaki işlevi ile termal görüntülemenin zamansal analizlere sunduğu katmanlı veri desteği, sürecin farklı boyutlarını tamamlamaktadır. Tablo 1’de sunulan karşılaştırmalı değerlendirme, her bir teknolojinin operasyonel parametrelerini ve uygulama sınırlılıklarını özetlemektedir. Bu nedenle güvenilir bir adli belgeleme süreci, tek bir teknolojik enstrümana indirgenmek yerine farklı yöntemlerin birbirini denetlediği ve bütünleşik bir iş akışı içerisinde toplandığı hibrit bir modelin tesis edilmesini zorunlu kılmaktadır.

İHA tabanlı fotogrametri ve LIDAR teknolojileri, olay yerinin üç boyutlu dijital ikizinin oluşturulmasında birbirini tamamlayan iki temel yaklaşım sunmaktadır. Fotogrametri, geniş sahaların hızlı taranmasında maliyet-etkinlik avantajı sağlamakla birlikte, ışık koşullarına bağımlılığı ve homojen yüzeylerdeki eşleştirme hataları nedeniyle belirli senaryolarda sınırlı kalmaktadır. LIDAR sistemleri ise aktif sensör mimarisıyla bu kısıtlamaları aşarak karanlık ortamlarda ve karmaşık geometrilere milimetrik hassasiyet sunmaktadır; ancak yüksek donanım maliyeti ve atmosferik engellere duyarlılık, yaygın operasyonel benimsenmesini kısıtlamaktadır. Mobil LIDAR sensörlerinin artan erişilebilirliği bu maliyet engelini kısmen azaltmakla birlikte, cihazlara özgü kalibrasyon protokollerinin ve hata toleransını minimize eden veri işleme algoritmalarının geliştirilmesi hâlâ çözüm bekleyen metodolojik gereklilikler arasındadır.

Hiperspektral, ultraviyole ve kızılötesi görüntüleme teknikleri, görünür spektrumun ötesinde latent delillerin tahribatsız tespitine olanak tanımaktadır. HSI’nin çok bantlı veri toplama kapasitesi, biyolojik kalıntıların yalnızca görselleştirilmesini değil moleküler bileşime dayalı ayrıştırılmasını da mümkün kılmakta; ancak yoğun veri işleme gereksinimi ve kalibrasyon hassasiyeti, sistemin operasyonel esnekliğini sınırlandırmaktadır. UV görüntüleme sahada hızlı tarama avantajı sunarken, uzun süreli maruziyetin DNA bütünlüğü üzerindeki olumsuz etkisi göz ardı edilmemelidir. IR teknikleri ise düşük kontrastlı izlerin optik ayrımında ve belge analitiğinde işlevsel olmakla birlikte, yüzey özelliklerine ve çevresel değişkenlere duyarlılığı nedeniyle tek başına kesin sonuçlar üretmekten ziyade doğrulayıcı bir katman olarak konumlandırılmalıdır.

Termal görüntüleme, sıcaklık farklılıklarına dayalı temassız algılama kapasitesiyle diğer optik yöntemlerden ayrılan özgün bir işlev üstlenmektedir. Özellikle zamansal analiz boyutunda-yakın zamanda kullanılmış nesnelerin ısı izleri, ayakkabı tabanı termal kalıntıları ve postmortem süreçlerdeki biyojenik ısı değişimleri-sunduğu kronolojik veri, olayın zaman çizelgesinin yeniden yapılandırılmasında kritik bir girdi oluşturmaktadır. Bununla birlikte, emisivite farklılıklarının ölçüm doğruluğunu etkilemesi ve küçük hedeflerin tespitinde çözünürlük sınırlılıkları, termal verilerin diğer görüntüleme çıktılarıyla çapraz doğrulanmasını zorunlu kılmaktadır.

Tablo 1. Olay Yerinde Belgeleme Teknolojilerinin Karşılaştırmalı Özeti

| Teknoloji           | Çalışma prensibi  | Bant / çözünürlük  | Temel uygulama alanları  | Güçlü yönler  | Sınırlıklar ve riskler   |
|---------------------|---|--|--|---|--|
| İHA Fotogrametri    | Pasif / görünür ışık tabanlı görüntü eşleştirme   | Santimetre-altı doğruluk (Galanakis vd., 2021)   | Geniş alan belgeleme, trafik kazası, toplu felaket sahası  | Düşük maliyet, hızlı veri toplama, operasyonel esneklik                                 | Aydınlatma ve hava koşuluna duyarlılık; homojen yüzeylerde hata, hava sahası kısıtları   |
| LiDAR (yersel)      | Aktif / lazer tarama, nokta bulutu  | Milimetrik doğruluk aralığı (Wen vd., 2013)  | Kapalı mekân belgeleme, balistik izlerin geometrik analizi (Raneri, 2018)  | Işıktan bağımsız tarama, yüksek yoğunluklu 3D model üretimi                             | Yüksek donanım maliyeti; yansıtıcı yüzeylerde gürültü ve boşluk, sis ve nem etkisi   |
| LiDAR (havadan)     | Aktif / havadan lazer tarama (İHA-LiDAR), nokta bulutu                                    | Uçuş irtifası ve tarama yoğunluğuna bağlı (Berezowski vd., 2022)   | Geniş ölçekli arazi belgeleme, ormanlık alanlarda yüzey modelleme  | Geniş alanlarda hızlı haritalama, vektasyon altında yüzey bilgisi elde etme potansiyeli | Yüksek operasyonel maliyet; veri işleme yükü, uçuş ve hava koşullu kısıtları   |
| Hiperspektral (HSI) | Pasif / çok bantlı spektral görüntüleme   | Bant sayısı sensöre bağlı, piksel düzeyinde spektral imza  | Biyolojik iz ayırıştırma, vücut sıvısı sınıflandırma, patlayıcı tespiti (Edelman vd., 2012; Malegori vd., 2020; Yüksel vd., 2021; Kottner vd., 2021) | Görüntü bant ötesinde ayırıştırma, materyal sınıflandırma ve haritalama kapasitesi      | Yüksek veri hacmi; saha kalibrasyonu, hesaplama yükü ve standardizasyon gereksinimi  |
| UV-ALS görüntüleme  | Pasif / floresans uyarımı (ALS)   | Uyarım ve emisyon bantları uygulamaya bağlı (Finnis vd., 2023; Vinkler ve Lednev, 2009)                                      | Biyolojik sıvı taraması, semen ve vajinal materyal ayırıştırma   | Hızlı saha taraması düşük donanım maliyeti, ön değerlendirme kapasitesi                 | UV maruziyetinde DNA bütünlüğü zayıflayabilir (Cabral de Almada vd., 2024) yalancı sinyal riski, doğrulayıcı test gereksinimi            |
| IR görüntüleme      | Pasif / yansımabsorpsiyon temelli görüntüleme   | NIR-MIR-FIR bantları, bant seçimi uygulamaya bağlı (Ozaki, 2021)   | Kan ve düşük kontrastlı iz saptama (Lin vd., 2007), belge ve mürekkep ayırıştırma (Schmid vd., 2022)   | Görüntüde benzer tonlu mürekkep ve katmanlarda kontrast artışı tahribatsız inceleme     | Penetrasyon derinliği yüzeye bağlı düşük emisivite ve yüksek yansıtıcılıkta sinyal zayıflayabilir (Asırdizer, Hekimoglu, ve Gumus, 2016) |
| Termal görüntüleme  | Pasif / termal radyasyon algılama (termografi) (Kesić ve Bjelovuk, 2019; Zheng vd., 2024) | Emisiviteye duyarlı ölçüm (Nandhakumar ve Aggarwal, 1988: 471-472); küçük hedeflerde SR ile iyileştirme (Chaverot vd., 2023) | Postmortem ısı anomalileri (Lee vd., 2018), soğuma profili ile süre tahmini (Chua vd., 2018); canlı tespiti (Nigam, 2018)                            | Karanlık ve duman koşullarında çalışma; zaman temelli iz analizi                        | Emisivite ve yansıtıcılık kaynaklı sapma; mekânsal çözünürlük sınırlaması, SR hesaplama maliyeti (Chaverot vd., 2023)                    |

Not: Tabloda yer alan bant ve doğruluk ifadeleri, teknoloji sınıfına göre farklı ölçütlerle raporlanmıştır; değerler doğrudan aynı ölçüm ölçeği üzerinden yorumlanmamalıdır.

İleri görüntüleme sistemlerinin ürettiği yüksek hacimli ve heterojen veri kümeleri, manuel değerlendirme kapasitesinin ötesine geçerek yapay zeka tabanlı analitik araçların adli iş akışlarına entegrasyonunu kaçınılmaz kılmaktadır. Makine öğrenimi ve derin öğrenme algoritmaları, fotogrametrik modellerin otomatik sınıflandırılması, spektral verilerdeki anomali örüntülerinin tespiti ve görüntü tabanlı delil karşılaştırmalarında nesnel bir analiz çerçevesi sunma potansiyeli taşımaktadır. Ancak bu sistemlerin adli geçerliliği, algoritmaların şeffaflığı, eğitim verilerindeki olası yanlışlıkların denetimi ve çıktıların uzman yorumuyla doğrulanması gibi metodolojik gerekliliklere bağlıdır. Dolayısıyla yapay zeka destekli görüntü analitiğinin operasyonel benimsenmesi, teknolojik kapasitenin ötesinde standartlaştırılmış doğrulama protokolleri ve disiplinlerarası denetim mekanizmalarının tesisini gerektirmektedir.

Dijital görüntüleme teknolojilerinin ürettiği verilerin mahkeme süreçlerindeki güvenilirliği, delil zincirinin kesintisiz izlenebilirliği ve veri bütünlüğünün kriptografik yöntemlerle teyit edilebilmesine bağlıdır. Blokzinciri tabanlı dağıtık defter teknolojileri, görüntü dosyalarının zaman damgalı özet değerlerini değiştirilemez bir kayıt altyapısında saklayarak retroaktif manipülasyon riskini minimize etme kapasitesi sunmaktadır. Bununla birlikte bu teknolojinin adli ekosistemde işlevsel hale gelebilmesi; kurumlar arası veri paylaşım standartlarının belirlenmesi, rol tabanlı erişim protokollerinin tanımlanması ve hukuki kabul edilebilirlik kriterlerinin ulusal mevzuatla uyumlaştırılması gibi yapısal ön koşulların karşılanmasını zorunlu kılmaktadır.

Bu çalışmanın sunduğu genel değerlendirme, ileri görüntüleme teknolojilerinin adli bilimlerde nitelikli bir analiz kapasitesi oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Ancak bu teknolojik kapasitenin sahada sürdürülebilir ve yargılama süreçlerinde geçerli sonuçlara dönüşmesi, standardize edilmiş operasyonel protokoller, kapsamlı uzmanlık eğitimleri ve katı kalite güvence mekanizmalarıyla desteklenmesine bağlıdır. Teknolojik geçişin başarısı salt donanım ve altyapı yatırımlarıyla sınırlı kalmayıp kurumlar arası koordinasyon, disiplinlerarası veri entegrasyonu ve bilimsel güvenilirliği odağına alan kapsayıcı bir uygulama ekosisteminin inşasıyla mümkün olabileceği düşünülmektedir.

## Kaynakça

- Airlie, M., Chaseling, J., Krosch, M. N., ve Wright, K. (2022). An evaluation of infrared photography for detecting bloodstains on dark-coloured floor coverings commonly encountered at crime scenes. *Australian Journal of Forensic Sciences*, 54(2), 280-292. <https://doi.org/10.1080/00450618.2020.1805012>
- Asirdizer, M., Hekimoglu, Y., ve Gumus, O. (2016). Usage of infrared-based technologies in forensic sciences. İçinde B. S. K. Shetty & P. P. J. Rao (Eds.), *Forensic analysis-From death to justice. InTech*. <https://doi.org/10.5772/62773>
- Berezowski, V., Moffat, I., Shendryk, Y., MacGregor, D., Ellis, J., ve Mallett, X. (2022). A multidisciplinary approach to locating clandestine gravesites in cold cases: Combining geographic profiling, LiDAR, and near surface geophysics. *Forensic Science International: Synergy*, 5, 100281. <https://doi.org/10.1016/j.fsisyn.2022.100281>
- Cabral De Almada, C. H., Poulsen, F., ve Hitchcock, C. (2024). Degrading DNA profiles to a specific level using UV exposure. *Australian Journal of Forensic Sciences*, 56(sup1), 23-25. <https://doi.org/10.1080/00450618.2024.2324723>
- Chaverot, M., Carré, M., Jourlin, M., Bensrhair, A., ve Grisel, R. (2023). Improvement of small objects detection in thermal images. *Integrated Computer-Aided Engineering*, 30(4), 311-325. <https://doi.org/10.3233/ICA-230715>
- Chua, J., Dyer, A., ve Garcia, J. (2018). Hot shoes in the room: Authentication of thermal imaging for quantitative forensic analysis. *Journal of Imaging*, 4(1), 21. <https://doi.org/10.3390/jimaging4010021>
- Edelman, G., Van Leeuwen, T. G., ve Aalders, M. C. G. (2012). Hyperspectral imaging for the age estimation of blood stains at the crime scene. *Forensic Science International*, 223(1-3), 72-77. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2012.08.003>
- Esposito, M., Sessa, F., Cocimano, G., Zuccarello, P., Rocuzzo, S., ve Salerno, M. (2023). Advances in technologies in crime scene investigation. *Diagnostics*, 13(20), 3169. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13203169>
- Finnis, J., Davidson, G., Fraser, I., Murphy, C., Hargreaves, C., Stevenson, N., Doole, S., ve Rogers, C. (2023). Illuminating the benefits and limitations of forensic light sources. *Science & Justice*, 63(1), 127-134. <https://doi.org/10.1016/j.scijus.2022.12.001>
- Galanakis, G., Zabulis, X., Evdaimon, T., Fikenscher, S.-E., Allertseder, S., Tsirikla, T., ve Vrochidis, S. (2021). A study of 3D digitisation modalities for crime scene investigation. *Forensic Sciences*, 1(2), 56-85. <https://doi.org/10.3390/forensicsci1020008>
- Georgiou, A., Masters, P., Johnson, S., & Feetham, L. (2022). UAV-assisted real-time evidence detection in outdoor crime scene investigations. *Journal of Forensic Sciences*, 67(3), 1221-1232. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.15009>

- Holowko, E.,** Januszkiewicz, K., Bolewicki, P., Sitnik, R., ve Michoński, J. (2016). Application of multi-resolution 3D techniques in crime scene documentation with bloodstain pattern analysis. *Forensic Science International*, 267, 218-227. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2016.08.036>
- Huang, W., Wang, G., Xu, X., Yu, T., ve Yang, Z. (2010). Forensic inspection of document using visible and near-infrared spectral imaging. *Proceedings of SPIE, Optoelectronic Imaging and Multimedia Technology*, 7850, 78500W. <https://doi.org/10.1117/12.869865>
- Jiang, P.-Y., Li, Z.-P., Ye, W.-L., Hong, Y., Dai, C., Huang, X., Xi, S.-Q., Lu, J., Cui, D.-J., Cao, Y., Xu, F., ve Pan, J.-W. (2023). Long range 3D imaging through atmospheric obscurants using array-based single-photon LiDAR. *Optics Express*, 31(10), 16054. <https://doi.org/10.1364/OE.487560>
- Kesić, T. V., ve Bjelovuk, I. (2019). Application of thermal imaging cameras in crime detection. *TEME*, 43(4), 997-1011. <https://doi.org/10.22190/TEME191014059K>
- Kottner, S., Thali, M. J., ve Gascho, D. (2023). Using the iPhone's LiDAR technology to capture 3D forensic data at crime and crash scenes. *Forensic Imaging*, 32, 200535. <https://doi.org/10.1016/j.fri.2023.200535>
- Lee, M. J., Voss, S. C., Franklin, D., ve Dadour, I. R. (2018). Preliminary investigation of aircraft mounted thermal imaging to locate decomposing remains via the heat produced by larval aggregations. *Forensic Science International*, 289, 175-185. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2018.05.028>
- Lin, A. C., Hsieh, H., Tsai, L., Linacre, A., ve Lee, J. C. (2007). Forensic applications of infrared imaging for the detection and recording of latent evidence. *Journal of Forensic Sciences*, 52(5), 1148-1150. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2007.00502.x>
- Malegori, C., Alladio, E., Oliveri, P., Manis, C., Vincenti, M., Garofano, P., Barni, F., ve Berti, A. (2020). Identification of invisible biological traces in forensic evidences by hyperspectral NIR imaging combined with chemometrics. *Talanta*, 215, 120911. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.120911>
- Maneli, M. A., ve Isafiade, O. E. (2022). 3D forensic crime scene reconstruction involving immersive technology: A systematic literature review. *IEEE Access*, 10, 88821-88857. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3199437>
- Nandhakumar, N., ve Aggarwal, J. K. (1988). Integrated analysis of thermal and visual images for scene interpretation. *IEEE* 10(4), 469-481. <https://doi.org/10.1109/34.3911>
- Nigam, R. K. (2018). Application of thermal imaging in forensic vision. *Indonesian Journal of Legal and Forensic Sciences*, 8(1), 15-18. <https://doi.org/10.24843/IJLFS.2018.v08.i01.p03>
- Ozaki, Y. (2021). Infrared spectroscopy-Mid-infrared, near-infrared, and far-infrared/terahertz spectroscopy. *Analytical Sciences*, 37(9), 1193-1212. <https://doi.org/10.2116/analsci.20R008>

- Raneri, D. (2018). Enhancing forensic investigation through the use of modern three-dimensional (3D) imaging technologies for crime scene reconstruction. *Australian Journal of Forensic Sciences*, 50(6), 697-707. <https://doi.org/10.1080/00450618.2018.1424245>
- Schmid, A., Heckelbacher, L., ve Wimmer, R. (2022). Extracting handwritten annotations from printed documents via infrared scanning. *CHI Conference on Human Factors in Computing Systems Extended Abstracts*, 1-6. <https://doi.org/10.1145/3491101.3519872>
- Syed Mohd Daud, S. M., Heo, C. C., Mohd Yusof, M. Y. P., Khoo, L. S., Chainchel Singh, M. K., Mahmood, M. S., Bin Muhammad Nasir, M. D., ve Nawawi, H. (2024). Use of thermal drone in detection and assessment of larval mass temperature in decomposed rabbit carcasses. *Journal of Forensic Sciences*, 69(2), 542-553. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.15466>
- Tisserand, S. (2021). VIS-NIR hyperspectral cameras. *Photoniques*, 110, 58-64. <https://doi.org/10.1051/photon/202111058>
- Virkler, K., ve Lednev, I. K. (2009). Analysis of body fluids for forensic purposes: From laboratory testing to non-destructive rapid confirmatory identification at a crime scene. *Forensic Science International*, 188(1-3), 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2009.02.013>
- Wen, C.-Y., Chen, H.-H., Lin, C.-K., ve Yang, W.-C. (2013). A study of applying light detection and ranging (LiDAR) to crime scene documentation. *Forensic Science Journal*, 12(1), 31-46. <http://fsjournal.cpu.edu.tw>
- Yüksel, S. E., Küçük, S., Tekeli, V., Kılıç, B., Karakaya, R. H., ve Zeka, M. B. (2021). El yapımı patlayıcıların ve patlayıcı maddelerin tespitinde kullanılan spektroskopi tabanlı yöntemlerin karşılaştırılmasına ilişkin bir inceleme. *Savunma Bilimleri Dergisi*, 39, 29-65. <https://doi.org/10.17134/khosbd.913675>
- Zheng, P., Liu, Y., Wu, H., ve Wang, H. (2024). Non-invasive infrared thermography technology for thermal comfort: A review. *Building and Environment*, 248, 111079. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111079>





# Bölüm 14

## Lİ BATARYA GERİDÖNÜŞÜMÜNDE YASAL VE ÇEVRESEL GEREKLİLİKLER

*Esra Kılavuz<sup>1</sup>, Gülşah Germen Tutaş<sup>2</sup>*

1 Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Merkezi Araştırma Lab.

2 Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Merkezi Araştırma Lab.

## 1. Giriş

Lithium-iyon batarya (LIB) endüstrisi, sürdürülebilir enerji sistemlerine yönelik küresel geçiş sayesinde hızla büyümektedir ve bu bataryaları taşınabilir elektroniklerden elektrikli araçlara (EV'ler) ve şebeke ölçekli enerji depolamaya kadar modern teknolojinin temel taşı haline getirmektedir. Ancak bu hızlı benimseme, 2030 yılına kadar tahmini 318 GWh (yaklaşık 5,3 milyon EV bataryası) kullanım ömrünü tamamlayacak olan atık batarya hacmi göz önüne alındığında, kaynak yönetimi ve çevresel sürdürülebilirlik açısından ciddi zorluklar yaratmaktadır (Gianvincenzi et al., 2024; Natarajan et al., 2018). Sınırlı kritik hammadde kaynaklarının etkisini azaltmak ve sürdürülebilir LIB kullanımını sağlamak için sağlam geri dönüşüm ve kaynak geri kazanım stratejileri acil bir ihtiyaçtır. Farklı LIB türleri, kullanım amaçlarına göre değişir: akıllı telefonlar gibi ev elektroniğinde yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle Lityum Kobalt Oksit (LCO) tercih edilirken, EV'ler enerji yoğunluğu ve döngü ömrü için Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit (NMC), Lityum Demir Fosfat (LFP) veya Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit (NCA) kimyalarını kullanır (He et al., 2017; Ma et al., 2021; Punt et al., 2022; Zhou et al., 2024). Bu bataryalardaki en çok kaynak talep eden ve stratejik öneme sahip mineraller lityum ve kobalttır. Lityum, bataryanın yalnızca küçük bir bölümünü oluştursa da elektrokimyasal performans için vazgeçilmezdir. Karasal rezervler sınırlı ve yoğunlaşmıştır, geleneksel çıkarım yöntemleri ise yavaş, verimsiz ve çevresel açıdan zorlayıcıdır. Kobalt ise, katot bileşimlerinin önemli bir kısmını oluşturur ve yüksek maliyeti ile küresel tedarikinin büyük ölçüde siyasi olarak istikrarsız bölgelerden özellikle Demokratik Kongo Cumhuriyeti sağlanması, tedarik zincirinde istikrarsızlık ve etik endişeler yaratmaktadır. Ayrıca, yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle EV'lerde kullanılan Ni-zengin malzemelerin (NMC) yaygınlaşmasıyla nikel talebi hızla artmakta ve nikel geri dönüşümünü öncelikli bir hedef haline getirmektedir (Gaines et al., 2016; Zeng ve Li, 2013). Bu malzemelerin geri kazanımı için geri dönüşüm yöntemlerinin geliştirilmesi hayati önem taşımaktadır, ancak mevcut teknikler bir dizi zorlukla karşı karşıyadır. LIB kimyası ve tasarımlarındaki heterojenlik, standartlaştırılmış süreçleri zorlaştırmakta ve malzeme geri kazanım verimliliğini düşürmektedir. Ayrıca hem pirometalurjik hem de hidrometalurjik yaklaşımlar genellikle enerji yoğunudur ve önemli miktarda atık su ve potansiyel olarak toksik gaz emisyonları üreten kimyasal reaktiflere dayanır. Bu teknik, ekonomik ve çevresel sınırlamalar, LIB'ler için gerçek bir döngüsel ekonominin gerçekleştirilmesini engellemektedir. Bu nedenle, batarya atıklarının çevresel etkisini azaltmak ve etik ve jeopolitik riskler altında tedarik edilen temel hammaddeler üzerindeki tedarik zinciri baskılarını hafifletmek için geliştirilmiş geri dönüşüm tekniklerine acilen ihtiyaç vardır (Asadi Dalini et al., 2020; Xiaodong ve Ishchenko, 2024).

## 2. Lityum İyon Atıklarının Kaynak Kıtlığı ve Çevresel Sonuçları

### 2.1. Lityum İyon Pil Bileşimi ve Geri Dönüşüm Gerekliliği

Lityum-iyon bataryaların (LIB) bileşenleri arasında kobalt (Co), bakır (Cu), nikel (Ni), lityum (Li), manganez (Mn), alüminyum (Al), demir (Fe), grafit, flor (F) ve fosfor (P) bulunur. Bunların en değerli kısımları LCO, NMC, LFP, LMO ve NCA gibi bileşiklerden oluşan katot malzemeleridir. Piyasada en büyük paya sahip olan NMC katotları, yaklaşık %40–50, nikel, manganez ve kobalt içerir. Hızla benimsenen LFP ise (%30–44) demir ve fosfattan oluştuğu için nikel ve kobalt gibi kritik metaller içermez. NCA ise yüksek oranda nikel ve kobalt içerir (H. Li et al., 2024a, 2024b).

LIB'lerin her bir katot kimyası farklı avantaj ve dezavantajlara sahiptir: LCO yüksek enerji yoğunluğu sunarken maliyetli ve güvenlik sorunları taşır; LMO (Spinel) maliyet etkin ve güvenlidir ancak çevrim performansı düşüktür; LFP en güvenli malzeme olup uzun ömür ve yüksek hızlı performans sunar; NCM iyi çevrim stabilitesi ve dengeli maliyetle yüksek kapasite sağlar; NCA ise yüksek kapasiteli olmasına rağmen daha az kararlı kristal yapıya sahiptir. Anotlarda genellikle grafit kullanılırken, silikon, sert karbon ve lityum titanat gibi daha yüksek kapasiteli ve güvenli alternatifler araştırılmaktadır (Georgi-Maschler et al., 2012; J. Hu et al., 2022; Natarajan et al., 2018; Spatharotis et al., 2020). Elektrolit olarak çoğunlukla LiPF<sub>6</sub> bazlı organik çözücüler kullanılır, ancak güvenliği artırmak için katı hal elektrolit sistemlerine geçişe odaklanılmaktadır. Kullanım ömrü dolan LIB'lerde nikel, kobalt ve bakır en değerli elementlerdir, lityum ve manganez ise giderek artan bir hedef haline gelmektedir. Flor, demir ve alüminyum genellikle düşük ekonomik değerleri nedeniyle geri dönüşümde safsızlık olarak kabul edilir (Erickson et al., 2014; Tan et al., 2021).

EV üretimi, özellikle saf cevhere dayalı malzemelere bağımlılık nedeniyle, içten yanmalı motorlu araçlara göre %68'e kadar daha yüksek üretim emisyonlarına yol açar. Kobalt madenciliği (küresel arzın %60-70'i Kongo Demokratik Cumhuriyeti'nden sağlanmaktadır) etik kaygılar, insan hakları ihlalleri, yüksek sera gazı emisyonları ve çevresel yıkımla ilişkilidir. Lityum çıkarımı ise özellikle Güney Amerika'daki su yoğun tuzlu su operasyonlarından yerel su kaynaklarını tüketir, hassas ekosistemlere zarar verir ve düşük geri kazanım oranlarına sahiptir (Asadi Dalini et al., 2020; X. Wang et al., 2014). Bu zorluklar, birincil kaynaklara bağımlılığı azaltmak ve atık yönetimini sağlamak için LIB'ler için döngüsel ekonomi modeline geçişin aciliyetini vurgulamaktadır. Geri dönüşüm, kobalt, lityum ve nikel gibi değerli malzemeleri geri kazanarak çevresel kirliliği ve batarya üretiminin karbon ayak izini azaltır. Bataryaların uygunsuz şekilde bertarafının yol açabileceği tehlikeli elementlerin toprağa ve suya sızması riskini ortadan kaldırmak için etkili ve sürdürülebilir geri dönüşüm stratejileri kritik öneme sahiptir. Yasal düzenlemeler, Avrupa Birliği'ndeki Atık Pil Direktifi ve ABD'deki Genişletilmiş Üretici Sorumluluğu (EPR) programları gibi, geri dönüşüm hedeflerini ve yeni bataryalarda geri dönüştürülmüş malzeme kullanımını zorunlu kılmaktadır. Geri dönüşüme öncelik vermek, LIB'lerin çevresel ve sosyal maliyetlerini en aza indirerek daha sürdürülebilir bir geleceğin yolunu açacaktır (Wilburn, 2008).

#### Ekonomik Faktörler:

LIB'lara olan artan talep, özellikle EV'ler ve yenilenebilir enerji depolama sistemleri nedeniyle, kritik hammadde tedariki üzerinde önemli baskı yaratmakta ve bu kaynakların fiziksel mevcudiyeti konusunda endişelere yol açmaktadır. Co ve Li maden üretimi sırasıyla Kongo ve Avustralya'da yoğunlaşmıştır. Örneğin, 2025 yılına kadar beklenen Li talebi, tahmini rezervlerin yaklaşık %5,4'ünü, Co talebi ise rezervlerin %1,8'ini tüketme potansiyeline sahiptir. ABD Jeoloji Araştırması (USGS) 2022'de güncellenen Kritik Mineraller Listesi'ne nikel ve çinko da dahil edilmiş, bu da nikel açısından zengin LIB'lerin geri dönüşüm süreçlerini geliştirme ihtiyacını vurgulamıştır (Wilburn, 2008). Hızlı EV benimsenmesi gibi yüksek talep senaryolarında, küresel lityum ve kobalt rezervlerinin uzun vadeli ihtiyacı karşılama yetersiz kalacağı öngörülmektedir. Özellikle kobalt, batarya üretiminin küresel rezervlerin %10'undan fazlasını tüketebilecek olması nedeniyle daha büyük bir arz zorluğu teşkil etmektedir. Bu durum, tedarik zinciri kırılganlıkları, fiyat oynaklığı ve madencilik uygulamalarıyla ilgili etik kaygılar gibi çok yönlü zorlukları beraberinde getirmektedir.

ABD Enerji Bakanlığı (DOE), batarya ve batarya malzemelerinin yurt içi üretimini güçlendirmek amacıyla Altyapı Yasası aracılığıyla 4,82 milyar dolar fon ayırmış, bu fonun bir kısmı lityum, grafit

ve lityum-iyon batarya geri dönüşüm tesislerinin inşasına ve genişletilmesine odaklanmıştır (Zand ve Abduli, 2008). Geri dönüşüm, kullanılmış bataryalardan değerli malzemeleri geri kazanarak, bakir madencilğe olan bağımlılığı azaltarak, sonlu rezervlerin ömrünü uzatarak ve batarya üretiminin çevresel ayak izini küçülterek bu sorunlara umut verici bir çözüm sunmaktadır. Döngüsel bir ekonomi yaratmak, kaynakların coğrafi yoğunlaşmasından kaynaklanan tedarik zinciri risklerini azaltır ve daha istikrarlı bir malzeme tedariki sağlar. Hammadde fiyatlarının artmasıyla birlikte geri dönüşüm, ekonomik olarak uygun bir alternatif haline gelmektedir. Örneğin, lityum karbonat fiyatlarındaki son artış, geri dönüştürülmüş lityumu üreticiler için cazip bir seçenek yapmıştır. Geri dönüşüm pazarının 2030 yılına kadar önemli ölçüde büyümesi beklenmektedir (2020'de 200.000 metrik tondan 1,4 milyon metrik tona) (Ding et al., 2025; Gianvincenzi et al., 2024).

Batarya hücrelerinin toplam maliyetinin yarısından fazlasını oluşturan hammaddeler, özellikle kobalt fiyatındaki artış, üreticileri alternatif kaynaklar aramaya yönlendiren temel faktördür. Kobalt, nikelde yaklaşık altı kat daha pahalıdır ve fiyatındaki keskin artışlar, kobaltın çoğunlukla bakır ve nikel madenciliğinin yan ürünü olması nedeniyle üretimi kolayca artırma imkanını kısıtlamaktadır (Gargori et al., 2018; Xu et al., 2023). Lityum ise hafif olması ve batarya maliyetine kobalta göre daha az katkıda bulunması nedeniyle fiyat açısından daha az endişe kaynağıdır. Lityumun geri kazanımı, ekonomik teşviklerden çok çevresel kaygılarla motive edilmektedir. Metal fiyatlarında yakın zamanda yaşanan düşüşler (2024'te aşırı arza bağlı olarak %40 ila %60'luk düşüşler) bazı madencilik operasyonlarının askıya alınmasına yol açsa da uzun vadede LIB talebinin kritik metal fiyatlarını tekrar artırma potansiyeli bulunmaktadır.

LIB'lerin yaygınlaşması, mobil cihazlarda kullanılan eski nikel bazlı teknolojileri neredeyse tamamen devre dışı bırakmıştır. Artan atık LIB hacmi, Kaliforniya ve New York'taki bertaraf yasakları gibi düzenlemelerle birlikte, değerli metalleri geri kazanmak için alternatif atık yönetimi çözümlerini (özellikle geri dönüşüm sistemlerini) zorunlu kılmaktadır (Islam et al., 2025). Geri dönüşüm çabalarının ölçeklenebilirliği büyük ölçüde karmaşık ve sürekli gelişen bu atık akışından malzeme geri kazanımının ekonomik fizibilitesine bağlı olacaktır.

Artan küresel enerji talebi, iklim değişikliğini hafifletmek için fosil yakıtlardan sürdürülebilir ve yenilenebilir kaynaklara geçişi zorunlu kılmaktadır. Mevcut verilere göre fosil yakıtlar, küresel enerji arzının yaklaşık %80'ini oluşturmaya devam etmekte ve bu durum ciddi sera gazı emisyonlarına yol açmaktadır. Bu bağlamda, lityum-iyon bataryalar (LIB'ler) kritik bir enerji depolama çözümü olarak öne çıkmış ve yenilenebilir enerjiye geçişin kilit teknolojisi haline gelmiştir.

Ancak, LIB'lerin çevresel ayak izi büyük ölçüde üretim sürecinde kullanılan enerji kaynaklarına bağlıdır. Uluslararası Enerji Ajansı'na göre 2023 yılında küresel üretimin yaklaşık %77'sini oluşturan Çin'de, kömür ağırlıklı elektrik şebekesi kullanılarak üretilen bataryaların karbon ayak izi, daha temiz enerji kaynaklarına sahip bölgelerde örneğin Avrupa veya İsveç, üretilen bataryalara göre önemli ölçüde yüksektir (Insinna et al., 2023; Xu et al., 2023). Hücre üretimi için sera gazı emisyonları ortalama 10 kg CO<sub>2</sub>/kWh olarak tahmin edilse de, Çin şebekesiyle üretilen bir bataryanın karbon ayak izi 105 kg CO<sub>2</sub>/kWh'ye ulaşabilirken, düşük karbonlu AB şebekesiyle üretilen bir bataryanın ayak izi 78 kg CO<sub>2</sub>/kWh civarında olabilir (Sobianowska-Turek et al., 2021; X. Wang et al., 2014). Bu durum, LIB üretiminin çevresel etkisini azaltmada şebekenin karbonsuzlaştırılmasının kritik rolünü göstermektedir.

Ayrıca, kullanılmış LIB'lerin bertarafı ve geri dönüşümü önemli çevresel ve güvenlik sorunları yaratmaktadır. Yalnızca ABD'de yılda tahmini 3 milyar pil, yaklaşık 180.000 ton tehlikeli atık olarak atılmaktadır (L. Li et al., 2013; Xiaodong ve Ishchenko, 2024). Bu atıkların uygunsuz şekilde bertarafı, kobalt, nikel ve manganez gibi ağır metallerin toprağa ve yeraltı sularına sızmasına neden olabilir. Ayrıca, batarya içindeki elektrolitin suyla reaksiyonu sonucu hidrojen florür (HF) gibi toksik gazlar açığa çıkabilir. Bataryanın yanlış şarj edilmesi veya kötü kullanımı sonucu biriken lityum, suyla reaksiyona girerek hidrojen gazı ve lityum hidroksit (LiOH) üretebilir, bu da yangın veya patlama riskini artırır.

Batarya atığının kapsamı ve tehlike sınıflandırması, **black mass**, geri dönüşümden elde edilen pil tozu, dahil olmak üzere, tehlikeli atık olarak ele alınmasını gerektirmektedir (Gargori et al., 2018; Gupta et al., 2023). Eko-toksisite, LIB malzemelerinin çevreye salınımının etkisini değerlendirmek için önemli bir ölçüttür ve bu çalışmada CERCLA (Kapsamlı Çevre Müdahale, Tazminat ve Sorumluluk Yasası) Öncelikli Tehlikeli Maddeler Listesi'nden türetilen bir puanlama sistemi kullanılmıştır. Malzeme üretimiyle ilişkili çevresel etkiyi temsil etmek için ise Kümülatif Enerji Talebi (CED) temel bir ölçüt olarak seçilmiştir (Asadi Dalini et al., 2020; Chaudhary et al., 2024).

Geri dönüşüm, madencilik faaliyetlerinden kaynaklanan **habitat tahribatı, ormansızlaşma ve su kirliliği** gibi çevresel kirlilik risklerini azaltır. Tesisler, tehlikeli malzemeleri güvenli ve kontrollü bir şekilde işleyerek bu riskleri en aza indirir. Kobalt ve nikel gibi değerli metallerin geri kazanılması, madenciliğin çevresel yükünü hafifletir ve kaynak tükenmesi sorununu çözer. **Lityum ve kobaltın geri dönüştürülmesi, birincil üretime kıyasla çevresel etkiyi önemli ölçüde azaltır** (lityumun karbon ayak izini yaklaşık %50 ve kobaltın enerji talebini yaklaşık %30 azaltır). Geri dönüşüm, aynı zamanda kaynakların verimli kullanımını destekleyerek batarya üretiminin genel çevresel etkisini azaltır ve küresel iklim değişikliğiyle mücadele çabalarıyla uyumludur.

Ancak, küresel olarak kullanılmış bataryaların sadece yaklaşık **%5'i geri dönüştürülmektedir**, bu da çoğu malzemenin boşa harcandığı veya depolandığı anlamına gelir (Y. Hu et al., 2017; Sobianowska-Turek et al., 2021). LIB'lerin karmaşık bileşimi nedeniyle hem ekonomik olarak uygulanabilir hem de çevresel olarak sürdürülebilir tek bir geri dönüşüm yöntemi geliştirmek zordur, bu da yenilikçi ve kapsamlı stratejilere olan ihtiyacı pekiştirmektedir.

### 3. LIB Geri Dönüşüm Süreçlerindeki Yenilikler ve Zorluklar

#### 3.1. Mevcut Geri Dönüşüm Yöntemlerinin Değerlendirilmesi

LIB geri dönüşümü, stratejik hammadde tedarikini sağlamak, çevresel etkileri hafifletmek ve sürdürülebilirliği desteklemek için kritik öneme sahiptir. Güncel geri dönüşüm yaklaşımları, **pirometalurjik, hidrometalurjik ve doğrudan onarım** olmak üzere üç ana kategoriye ayrılmaktadır (Lee et al., 2024; H. Wang ve Friedrich, 2015; Zhang et al., 2024).

**Pirometalurji**, yüksek sıcaklıkta eritmeyi 1000 °C kullanan endüstriyel bir yöntemdir. Özellikle **Co içeren kimyalar** (LCO ve NCM) için uygulanır, ancak LFP gibi yüksek değerli geçiş metalleri içermeyenler için ekonomik olarak uygun değildir. Süreç, ön işlemden sonra, grafit veya alüminyum gibi indirgeyici ajanlar eşliğinde 1400–1700 °C'de ısıl işlem görmeyi içerir. Ürünler genellikle **Ni-, Co-, Mn- ve Cu-bazlı alaşımlardır**, lityum ise cürufa geçer ve ek işlemlerle çıkarılır. Güncel geliştirmeler, işletme sıcaklıklarını düşürmek ve Li geri kazanımını artırmak için yerinde indirgeyici

ajanlar ve **tuzda kavurma** tekniklerine (örneğin NH<sub>4</sub>Cl ile 350 °C'de Co ve Li geri kazanımı) odaklanmaktadır. Pirometalurji yöntemleri doğrudan kavurma, yerinde indirgemeli kavurma ve tuzda kavurma olarak sınıflandırılır. Yerinde indirgemeli kavurmada batarya bileşenlerindeki grafit, indirgeyici olarak kullanılır, ancak yüksek sıcaklıklar (>750 °C) Li kaybı riskini taşır.

**Hidrometalurji**, düşük enerji tüketimi, yüksek saflıkta ürün ve düşük CO<sub>2</sub> emisyonu avantajları sunan, **çözündürme ve ayırma/safılaştırma** aşamalarından oluşan sulu bir kimyasal işlemdir. Çözündürme adımında Li, Co, Ni ve Mn gibi metaller asitler, alkaliler veya derin ötektik çözücüler gibi özel çözücüler kullanılarak çözündürülür. Çözünen metaller daha sonra **çözücü ekstraksiyonu, kimyasal çöktürme veya sol-jel sentezi** gibi tekniklerle ayrıştırılır. Avantajlarına rağmen, hidrometalurji ön ayrıştırma, benzer metal iyonlarının ayrılması zorluğu ve atık su arıtma maliyetleri gibi zorluklarla karşılaşır. Çözündürme yöntemleri arasında alkali çözündürme (amonyak ve indirgeyici ajan kullanarak), asit çözündürme (biyo-çözündürme veya organik/hafif ajanlarla geliştirilen) ve özel çözücülerle çözündürme bulunur. Alkali çözündürme, pH'ı stabilize etmek için tampon sistemler kullanılarak verimlilik artırılmıştır.

**Doğrudan Geri Dönüşüm**, yüksek sıcaklık işlemlerinden kaçınarak düşük işletme maliyetleri sunar ve kullanılmış katot malzemelerinin elektrokimyasal performanslarını geri kazanmak için **doğrudan rejenerasyonuna** odaklanır. Ancak, malzeme geri kazanım verimliliği şu anda diğer yöntemlerin gerisindedir. Bu yöntemin geliştirilmesi, hidrotermal lityumlama ve ötektik çözücüler gibi optimal iyileştirme ajanlarının kullanımına odaklanmıştır.

Hidrometalurjik geri dönüşümde, yaygın olarak kullanılan **asit çözündürme**, HCl, HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> gibi inorganik asitlerle uygulanmaya devam etse de tehlikeli gaz emisyonları (Cl<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>) ve büyük hacimli asidik atık su oluşumu nedeniyle çevresel ve güvenlik sorunları yaratır. Çözündürme verimliliği, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> gibi indirgeyici ajanlarla geçiş metallerinin oksidasyon durumları düşürülerek artırılabilir. Sitrik, malik ve oksalik asit gibi **organik asitler** ise inorganik asitlere benzer verimler sunarken daha çevre dostu ve biyolojik olarak parçalanabilir bir alternatif sunar. Alternatif olarak, **yeşil alkali bazlı yöntemler**, LiFePO<sub>4</sub> bataryalardan sadece su ve NaOH kullanarak oda sıcaklığında Li, Fe, P gibi tüm elementlerin geri kazanımını içerecek şekilde geliştirilmiştir.

Çözündürme verimliliğini korurken asit tüketimini azaltmak için elektrokimyasal yöntemler, ultrason destekli çözündürme ve **mekanokimyasal aktivasyon** gibi yardımcı teknikler kullanılmaktadır. Mekanokimyasal yaklaşımda, elektrot malzemeleri katı bir reaktif ile öğütülerek yapıyı bozar ve çözünür maddelerin oluşumunu kolaylaştırır. **Biyo-çözündürme**, düşük enerji tüketimi ve çevresel uyumluluk avantajlarıyla öne çıkan, **mikrobiyal metabolizma** sırasında üretilen organik ve inorganik asitleri kullanan sürdürülebilir bir yaklaşımdır. Ancak, uzun kültürasyon süreleri, kontaminasyona duyarlılık ve düşük çözündürme verimlilikleri büyük ölçekli uygulamayı engellemektedir.

Geleneksel çözündürme ve biyo-çözündürmenin dezavantajlarına yanıt olarak, son çalışmalar **Derin Ötektik Çözücüler (DES'ler)** ve süperkritik akışkanlar (SCF'ler) gibi yenilikçi çözündürme sistemlerine odaklanmıştır. **DES'ler**, iki veya daha fazla toksik olmayan bileşiğin ötektik karışımıyla oluşan, çevre dostu ve metal oksitleri çözme kapasitesi yüksek çözücülerdir. Kompozisyonları çözündürme verimliliğini belirlemede kritik öneme sahiptir; yüksek indirgenabilirlik, yüksek değerli metal türlerinin çözünmesini artırır. DES'ler kullanılarak LCO ve NCM katotlarından verimli metal çözündürme ve Al folyo gibi yardımcı bileşenlerin ayrılması başarılmıştır (Örn: Kolin klorür-üre veya kolin klorür-sitrik asit karışımları).

**Yıkıcı Olmayan veya Doğrudan Rejenerasyon Yöntemleri**, bataryanın kristal yapısını koruyarak atom düzeyindeki bozulmayı önlemeyi ve kullanılmış katot malzemelerinin orijinal performansını geri yüklemeyi amaçlar. Bu yöntemler, işlem basitliği, düşük maliyet ve çevresel uyumluluk gibi önemli avantajlar sunar. Katot degradasyonu genellikle lityum tükenmesi, spinel veya kaya tuzu fazlarının oluşumu gibi **geri döndürülemez faz dönüşümlerinden** kaynaklanır. Doğrudan rejenerasyon, bu sorunları gidermek için **lityum ikmali stratejilerini** ısıtma işlemiyle birleştirir. Temel teknikler arasında doğrudan katı hal kalsinasyonu, hidrotermal relityasyon ve **ötektik Li<sup>+</sup> erimiş tuz relityasyonu** bulunur. Farklı kimyasal relityasyon yöntemleri de (örneğin LiI veya kinon aracılı redoks relityasyonu) geliştirilmiştir. **Ötektik Li<sup>+</sup> erimiş tuz relityasyonu**, düşük erime noktası ve hızlı iyon difüzyonu sayesinde doğrudan katot rejenerasyonu için umut verici bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

**EverBatt modeli** kullanılarak yapılan karşılaştırmalı analizler, **doğrudan geri dönüşümün** ticari pirometalurjik ve hidrometalurjik yöntemlere göre en avantajlı yöntem olduğunu göstermektedir.

- **Enerji Verimliliği:** Doğrudan geri dönüşüm, geri dönüştürülen batarya kilogramı başına yalnızca 4.5 MJ enerji tüketir, bu da hidrometalurjik işlemin gerektirdiği enerjinin sadece %15'i kadardır.
- **Çevresel Etki (Sera Gazı Emisyonu):** Doğrudan geri dönüşüm, geri dönüştürülen batarya kilogramı başına sadece 0,6 kg sera gazı yayarak diğer yöntemlere göre (pirometalurji 2,16 kg, hidrometalurji 2,27 kg) önemli ölçüde düşüktür.
- **Ekonomik Getiri:** Doğrudan geri dönüşüm, doğrudan yeniden kullanılabilir, yüksek değerli katot malzemesi ürettiği için en yüksek geliri (6.90) sağlar, diğer yöntemlerin elde ettiği daha düşük değerli öncül maddelerden daha karlıdır.

Araştırmacılar, doğrudan geri dönüşümün aşırı sıcaklık ve aşındırıcı kimyasallardan kaçınarak **"4H"** (**Yüksek verimlilik, Yüksek ekonomik getiri, Yüksek çevresel fayda ve Yüksek güvenlik**) ilkesini somutlaştırdığı sonucuna varmıştır.

### 3.2. Lityum İyon Pil Geri Dönüşümündeki Engeller ve Kısıtlamalar

Geleneksel olarak yüksek değerli katot malzemelerine (kobalt, nikel, lityum) odaklanılsa da artan kullanılmış LIB arzı ve dögüsel ekonomiye olan talep, **anot geri dönüşümünün** ekonomik önemini artırmaktadır. Anottan geri kazanılan temel değerli bileşenler arasında **grafit, bakır folyo ve lityum kalıntıları** bulunur. Lityum kalıntıları, şarj-deşarj döngüsü sırasında oluşan ve Li<sub>2</sub>O, Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> gibi türleri içeren **Katı Elektrolit Arayüzü (SEI) katmanından** ve grafitten gelir.

Bakır folyo, fiziksel yöntemlerle kolayca ayrılıp geri kazanılabilirken, SEI katmanındaki lityum kalıntıları su veya asit çözündürme ile geri kazanılabilir. Örneğin, hidroklorik asit veya su kullanılarak harcanmış grafitten **Li çözündürme verimi %99'un üzerinde** elde edilmiş ve grafitin kristal yapısı korunmuştur.

**Elektrolitler**, harcanmış LIB'lerde bir diğer önemli Li kaynağıdır. Bunlar genellikle LiPF<sub>6</sub> gibi lityum tuzları ve EC, PC gibi susuz organik çözücülerden oluşur. Geri kazanım yöntemleri arasında **organik çözücü ekstraksiyonu** ve daha avantajlı olan **süperkritik CO<sub>2</sub> ekstraksiyonu** bulunur (daha hafif çalışma koşulları, daha az safsızlık, basitleştirilmiş saflaştırma).

## Endüstriyel Ölçekte Geri Dönüşüm Süreci:

Laboratuvar çalışmalarında göz ardı edilen kilit adımlar, endüstriyel süreçte güvenlik, verimlilik ve ekonomik uygulanabilirlik açısından hayati önem taşır.

- 1. Toplama ve Deşarj:** Kullanılmış bataryaların geniş bir coğrafi alandan güvenli bir şekilde toplanması önemli bir lojistik zorluktur. Toplandıktan sonra, yangın/patlama riskini azaltmak için genellikle **tuzlu su çözeltileri** kullanılarak bataryalar tamamen deşarj edilir.
- 2. Sökme ve Ayırma:** Bataryalar, paketlerinden sökülür ve tek tek hücrelere ayrılır. Otomatik sensörler (manyetik ve optik) ve mekanik ayırıcılar, plastik gövde, Cu teller ve Al/çelik gibi bileşenleri ayırarak sonraki kimyasal işlemlerin verimliliğini artırır.
- 3. Mekanik İşleme:** Ayrılan hücreler, kontrollü bir şekilde çalışan özel **öğütücülerle** mekanik olarak işlenir. Bu süreç, katot ve anot malzemelerinden oluşan değerli bir karışım olan "**Black Mass**" üretir. Bu kütle, hidrometalurji veya pirometalurji gibi ileri kimyasal işlemler için ana hammadde görevi görür. Öğütme sırasında toz dağılmasını ve yangın risklerini önlemek için özel önlemler alınır.
- 4. Aktif Malzeme Ayırma:** Hücreler açıldıktan sonra, aktif malzemenin akım toplayıcıdan, iletken ajandan ve bağlayıcıdan ayrılması gerekir. Bağlayıcı kaldırma, NMP gibi çözücülerle çözme veya 500 °C'de termal ayrışma ile yapılır, ancak termal işlem zararlı yan ürünler konusunda endişe yaratır.
- 5. Atık Yönetimi:** Endüstriyel tesisler, süreç boyunca oluşan tüm atıkları yönetmek zorundadır. Ayrılan plastik ve metaller farklı geri dönüşüm akışlarına yönlendirilir. Ayrıca, piroliz gibi termal süreçlerden çıkan atık gazlar ve yüksek sıcaklıktaki atık ısı geri kazanılarak tesisin kendi enerji ihtiyacı için yeniden kullanılabilir.

## Geri Dönüşüm Zorlukları ve İnovasyon İhtiyacı:

- Standardizasyon ve Optimizasyon:** LIB'lerin şekil ve yapı çeşitliliği (pouch, silindirik, prizmatik), merkezi işlemeyi ve otomatik sökümünü engeller. Mevcut tasarımlar geri dönüştürülebilirliği göz ardı etmekte, bu da katot malzemesi ayırmayı zorlaştırmaktadır. Batarya yapısının optimizasyonu, olgunlaşmış üretim standartları nedeniyle en göz ardı edilen ve zorlu görev olmaya devam etmektedir.
- Sürdürülebilir Yöntemler:** Düşük kontaminasyon riski ve yüksek Black Mass kalitesi için uygun, geniş uygulanabilirliğe sahip, sürdürülebilir, ortam koşullarına uygun geri dönüşüm yöntemleri (özellikle hidrometalurjik ve doğrudan geri dönüşüm için) gereklidir.
- Mevzuat ve İş Modelleri:** Düzenleyici çerçeveler (AB Batarya Direktifi) ve artan kamuoyu bilinci teşvik edici olsa da uygulanabilir iş modelleri ve halk farkındalığı önemlidir.

## Geri Dönüşümün Çevresel Etkilerinin Yönetimi:

Geri dönüşümün çevresel faydaları olsa da süreçte oluşan kirlenici emisyonlar kontrol altına alınmalıdır.



- **Hava Kirliliği:** Sökme, öğütme, kalsinasyon, çözündürme ve kurutma gibi aşamalarda toz içeren gazlar, asidik gazlar (HCl, NO<sub>x</sub> vb.) ve organik gazlar açığa çıkar. Toz, siklonlar/torba filtrelerle; asidik gazlar alkalın püskürtmeli kulelerle (tek, iki veya üç aşamalı); organik gazlar ise adsorpsiyon veya katalitik yanma ile temizlenir.
- **Atık Su:** Deşarj ön işlemi ve katot malzeme geri kazanımı sırasında oluşur. Deşarj atık suyu çoğunlukla tuz içerir. Çözündürme ve ekstraksiyon atık suları ise Li tuzları, ultra ince karbon tozu ve düşük molekül ağırlıklı esterler gibi maddeler içerdiği için **yüksek derecede toksik** ve artırılması zordur. Çevresel etkiyi en aza indirmek için tuz giderme, genellikle **üç etkili veya MVR (Mekanik Buhar Sıkıştırma) buharlaştırma** yöntemleri kullanılarak kapalı döngü su yönetimi sağlanır.
- **Katı Atık:** Sökme sırasında ayrılan plastikler, devre kartları ve yüksek voltajlı kablolar gibi bileşenlerden oluşur. Endüstriyel katı atık depolaması sızıntı önleme, yağmurdan koruma ve toz kontrolü gibi çevresel standartlara uygun olmalıdır.

Sürecin sürekli optimizasyonu, kirlenici üretiminin azaltılması, anti-sızıntı önlemlerinin güçlendirilmesi ve toprak/yeraltı suyunun düzenli izlenmesi, geri dönüşümün çevresel güvenliğini sağlamak için hayati önem taşır.

### 3.2. Pil Tasarımı ve Malzeme Evriminden Kaynaklanan Zorluklar

Lityum-iyon batarya (LIB) tasarımlarının değişimi, özellikle bataryaların **sökülmesi ve ön işleme** tabii tutulması aşamalarında geri dönüşüm süreçleri için önemli zorluklar yaratmaktadır. LIB'ler, silindirik, prizmatik ve pouch hücreler olmak üzere üç ana tipte üretilir. Silindirik hücreler bir miktar standartlaşmış olsa da prizmatik ve özellikle şekil ve boyut açısından değişken olan pouch hücreler endüstri genelinde standartlaşmadan uzaktır. Bu farklı hücre tasarımları, EV üreticilerinin gereksinimlerine göre büyük ölçüde değişen modül ve paketlere entegre edilmektedir; bazı modüllerdeki hücreleri bağlamak için kullanılan epoksi reçine gibi uygulamalar sökme ve geri dönüşümü zorlaştırmaktadır. Tesla'nın "tabless" bataryası, BYD'nin blade batarya paketi ve CATL'nin cell-to-pack (CTP) teknolojisi gibi enerji yoğunluğunu ve üretim verimliliğini artıran yenilikçi batarya konfigürasyonları da geri dönüşüm çabalarını karmaşık hale getirmektedir. **Doğrudan geri dönüşüm** süreci, bu karmaşık ve değişken tasarımlar nedeniyle en büyük zorluklarla karşılaşırken, yüksek sıcaklık işlemi kullanan **pirometalurjik süreçler** tasarım farklılıklarından daha az etkilenmekte ancak daha az maliyet etkin olmaktadır. **Hidrometalurjik süreçler** ise kimyasal çözündürme ve ayırmayı birleştirerek orta bir yol sunmakta ancak maliyetleri azaltmak için yine de sökme ve ön işlem teknolojilerinde ilerlemeler gerektirmektedir. Gelecekteki batarya tasarımları, daha verimli geri dönüşümü sağlamak için kolay sökülebilirlik ve bileşen ayrımını dikkate almalıdır.

Katot malzemeleri, katmanlı oksitler, spinel oksitler ve polianyon oksitler olmak üzere üç ana kategoriye ayrılmıştır. NMC gibi katmanlı oksitler yüksek enerji yoğunluğu ve maliyet etkinliği nedeniyle en umut verici malzemelerdendir. Kapasiteyi artırmak ve maliyetleri düşürmek için **nikel içeriğini artırma ve kobalt içeriğini azaltma** yönünde açık bir eğilim bulunmaktadır. Ayrıca, üreticiler belirli performans hedeflerine ulaşmak için giderek daha fazla **farklı kimyalara sahip karışık katot malzemeleri** kullanmaktadır. Katot bileşimindeki bu çeşitlilik, geri dönüşüm süreçlerinin karışık malzemeleri işleyebilmesini ve bunları yeni bataryalarda yeniden kullanıma uygun formülasyonlara dönüştürebilmesini gerektirdiği için önemli zorluklar doğurmaktadır. Anot malzemeleri de grafitten silikon bazlı malzemelere ve lityum metal anotlara doğru evrilmektedir.

Mevcut LIB'lerde baskın olan grafit, düşük ekonomik değeri nedeniyle genellikle geri dönüştürülmemektedir, ancak artan atık LIB hacmi nedeniyle anot malzemeleri için geri dönüşüm teknolojileri geliştirilmelidir. Grafitin katmanlı yapısı uzun süreli çevrim sonrasında çökebilir veya lityum iyon araya girişiyle bloke olabilirken, silikon anotlar şiddetli genleşme ve büzülme nedeniyle yapısal bozulma ve parçacıkların ufalanması sorunu yaşamaktadır, bu da orijinal yapı ve performansı geri kazanmayı zorlaştırmaktadır.

Bu yapısal ve kimyasal zorlukların üstesinden gelmek için LIB geri dönüşüm teknolojilerinde daha fazla yenilik ve standartlaşma gereklidir.

#### 4. Sonuç

LIB sektörünün elektrikli araçlar, yenilenebilir enerji depolama ve taşınabilir elektronik talebiyle hızla büyümesi, **sürdürülebilir kaynak yönetimi** ihtiyacını kritik hale getirmiştir. LIB'ler enerji depolamada devrim yaratmış olsa da lityum, kobalt ve nikel gibi sınırlı ve coğrafi olarak yoğunlaşmış malzemelere olan bağımlılıkları önemli **çevresel, ekonomik ve etik zorluklar** ortaya çıkarmaktadır. Kullanım ömrü dolan LIB'lerdeki beklenen artış, kaynak kıtlığını azaltmak, çevresel etkileri en aza indirmek ve **döngüsel bir ekonomiyi** teşvik etmek için verimli geri dönüşüm stratejilerinin geliştirilmesinin aciliyetini artırmaktadır.

Mevcut geri dönüşüm teknolojileri (hidrometalurjik ve pirometalurjik yöntemler) değerli malzemeleri geri kazanmayı sağlasa da hala maliyetli ve çevresel açıdan ağır yükümlülükler getirmektedir. Elektrokimyasal ve biyolojik tabanlı geri kazanım süreçleri gibi gelişmekte olan yenilikler, çevresel zararı en aza indirirken geri dönüşüm verimliliğini artırmak için umut verici yollar sunmaktadır. Kobalt madenciliğiyle bağlantılı jeopolitik ve etik endişelerin giderilmesi ile lityum ve nikel gibi kritik malzemelerin geri kazanımının iyileştirilmesi, **istikrarlı ve sürdürülebilir bir tedarik zinciri** için esastır.

LIB'lerin geri dönüştürülmesi, batarya üretiminin çevresel ayak izini azaltmakla kalmaz, aynı zamanda kritik malzemelerin %95'e kadar geri kazanılmasıyla doğal kaynaklar üzerindeki baskıyı da hafifletir. Ancak, geri dönüşüm sürecinin kendisi hava ve su kirliliği gibi çevresel riskler taşıdığından, geri dönüşüm yöntemlerinin sürekli optimizasyonu ve etkili kirlilik kontrol önlemlerinin uygulanması gerekmektedir. Bu zorlukların üstesinden gelmek için teknolojik gelişmeleri, düzenleyici çerçeveleri ve uluslararası iş birliğini entegre eden **multidisipliner bir yaklaşım** hayati önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, yenilikçi geri dönüşüm stratejileri aracılığıyla LIB'lerin sürdürülebilir yönetimi, küresel geçişi daha temiz enerji sistemlerine desteklemek için **kilit rol oynamaktadır**. Endüstri, LIB geri dönüşümünün teknik, ekonomik ve çevresel engellerini aşarak, kritik kaynakların uzun vadeli yaşayabilirliğini sağlayabilir, birincil madenciliğe olan bağımlılığı azaltabilir ve daha sürdürülebilir ve etik bir enerji geleceğine katkıda bulunabilir.

## References

- (1) Oubaha, H.; Fkhar, L.; Cloots, R.; Boschini, F.; Mahmoud, A. Direct NCA Cathode Active Materials Recycling from Spent Li-Ion Batteries: Solvent-Free Recovery and Healing by Heat Treatment. *ACS Sustain. Resour. Manag.* **2024**, *1* (8), 1791–1801. <https://doi.org/10.1021/acssusresmgt.4c00133>.
- (2) Vauloup, J.; Bouilhac, C.; Coppey, N.; Lacroix-Desmazes, P.; Stievano, L.; Monconduit, L.; Sougrati, M. T. Towards a More Sustainable Leaching Process for Li-Ion Battery Cathode Material Recycling: Mechanochemical Leaching of LiCoO<sub>2</sub> Using Citric Acid. *ACS Sustain. Resour. Manag.* **2024**. <https://doi.org/10.1021/acssusresmgt.4c00175>.
- (3) Hayagan, N.; AYMONIER, C.; Croguennec, L.; Faure, C.; Ledeuil, J.-B.; Morcrette, M.; Dedryvère, R.; OLCHOWKA, J.; Philippot, G. Direct Recycling Process Using Pressurized CO<sub>2</sub> for Li-Ion Batteries Positive Electrode Production Scraps. *SSRN Electron. J.* **2024**. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4735734>.
- (6) Kevin, S. Deep Eutectic Solvent-Aqueous Two-Phase Leaching System for Direct Separation of Lithium and Critical Metals Lithium-Ion Battery Industry Cycle. **2024**. <https://doi.org/10.1021/acssusresmgt.4c00339>.
- (7) Li, L.; Ge, J.; Wu, F.; Chen, R.; Chen, S.; Wu, B. Recovery of Cobalt and Lithium from Spent Lithium Ion Batteries Using Organic Citric Acid as Leachant. *J. Hazard. Mater.* **2010**, *176* (1–3), 288–293. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.11.026>.
- (10) Tran, M. K.; Rodrigues, M. T. F.; Kato, K.; Babu, G.; Ajayan, P. M. Deep Eutectic Solvents for Cathode Recycling of Li-Ion Batteries. *Nat. Energy* **2019**, *4* (4), 339–345. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0368-4>.
- (11) Hayagan, N.; Gaalich, I.; Loubet, P.; Croguennec, L.; Aymonier, C.; Philippot, G.; Olchowka, J. Challenges and Perspectives for Direct Recycling of Electrode Scraps and End-of-Life Lithium-Ion Batteries. *Batter. Supercaps* **2024**, *7* (6). <https://doi.org/10.1002/batt.202400120>.
- (12) Gupta, V.; Yu, X.; Gao, H.; Brooks, C.; Li, W.; Chen, Z. Scalable Direct Recycling of Cathode Black Mass from Spent Lithium-Ion Batteries. *Adv. Energy Mater.* **2023**, *13* (6), 1–8. <https://doi.org/10.1002/aenm.202203093>.
- (16) Zhang, H.; Han, Y.; Lai, J.; Wolf, J.; Lei, Z.; Yang, Y.; Shi, F. Direct Extraction of Lithium from Ores by Electrochemical Leaching. *Nat. Commun.* **2024**, *15* (1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48867-0>.
- (17) Wang, H.; Friedrich, B. Development of a Highly Efficient Hydrometallurgical Recycling Process for Automotive Li-Ion Batteries. *J. Sustain. Metall.* **2015**, *1* (2), 168–178. <https://doi.org/10.1007/s40831-015-0016-6>.
- (18) Chen, W.; Cheng, Y.; Chen, J.; Bets, K. V.; Salvatierra, R. V.; Ge, C.; Li, J. T.; Luong, D. X.; Kittrell, C.; Wang, Z.; McHugh, E. A.; Gao, G.; Deng, B.; Han, Y.; Yakobson, B. I.; Tour, J. M. Nondestructive Flash Cathode Recycling. *Nat. Commun.* **2024**, *15* (1). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-50324-x>.
- (19) Zubi, G.; Dufo-López, R.; Carvalho, M.; Pasaoglu, G. The Lithium-Ion Battery: State of the Art and Future Perspectives. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2018**, *89* (March), 292–308. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.002>.
- (20) Hu, J.; Jiang, Y.; Li, L.; Yu, Z.; Wang, C.; Gill, G.; Xiao, J.; Cavagnaro, R. J.; Kuo, L. J.; Asmussen, R. M.; Lu, D. A Lithium Feedstock Pathway: Coupled Electrochemical Extraction and Direct Battery Materials Manufacturing. *ACS Energy Lett.* **2022**, *7* (8), 2420–2427. <https://doi.org/10.1021/acsenerylett.2c01216>.

- (21) Yu, X.; Li, W.; Gupta, V.; Gao, H.; Tran, D.; Sarwar, S.; Chen, Z. Current Challenges in Efficient Lithium-Ion Batteries' Recycling: A Perspective. *Glob. Challenges* **2022**, *6* (12). <https://doi.org/10.1002/gch2.202200099>.
- (26) Gratz, E.; Sa, Q.; Apelian, D.; Wang, Y. A Closed Loop Process for Recycling Spent Lithium Ion Batteries. *J. Power Sources* **2014**, *262*, 255–262. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.03.126>.
- (27) Jha, M. K.; Kumari, A.; Jha, A. K.; Kumar, V.; Hait, J.; Pandey, B. D. Recovery of Lithium and Cobalt from Waste Lithium Ion Batteries of Mobile Phone. *Waste Manag.* **2013**, *33* (9), 1890–1897. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.05.008>.
- (28) Gaines, L.; Richa, K.; Spangenberg, J. Key Issues for Li-Ion Battery Recycling. *MRS Energy Sustain.* **2018**, *5* (1), 1–14. <https://doi.org/10.1557/mre.2018.13>.
- (29) Baum, Z. J.; Bird, R. E.; Yu, X.; Ma, J. Lithium-Ion Battery Recycling—Overview of Techniques and Trends. *ACS Energy Lett.* **2022**, *7* (2), 712–719. <https://doi.org/10.1021/acseenergylett.1c02602>.
- (30) Asadi Dalini, E.; Karimi, G.; Zandevakili, S.; Goodarzi, M. A Review on Environmental, Economic and Hydrometallurgical Processes of Recycling Spent Lithium-Ion Batteries. *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.* **2020**, *42* (7), 1–22. <https://doi.org/10.1080/08827508.2020.1781628>.
- (31) Viecelli, N.; Casasola, R.; Lombardo, G.; Ebin, B.; Petranikova, M. Hydrometallurgical Recycling of EV Lithium-Ion Batteries: Effects of Incineration on the Leaching Efficiency of Metals Using Sulfuric Acid. *Waste Manag.* **2021**, *125*, 192–203. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.039>.
- (34) Wang, W.; Wang, R.; Zhan, R.; Du, J.; Chen, Z.; Feng, R.; Tan, Y.; Hu, Y.; Ou, Y.; Yuan, Y.; Li, C.; Xiao, Y.; Sun, Y. Probing Hybrid LiFePO<sub>4</sub>/FePO<sub>4</sub> Phases in a Single Olive LiFePO<sub>4</sub> Particle and Their Recovering from Degraded Electric Vehicle Batteries. *Nano Lett.* **2023**, *23* (16), 7485–7492. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.3c01991>.
- (35) Zhang, S. S. Problems and Their Origins of Ni-Rich Layered Oxide Cathode Materials. *Energy Storage Mater.* **2020**, *24* (July 2019), 247–254. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.08.013>.
- (36) Park, N. Y.; Kim, S. Bin; Kim, M. C.; Han, S. M.; Kim, D. H.; Kim, M. S.; Sun, Y. K. Mechanism of Doping with High-Valence Elements for Developing Ni-Rich Cathode Materials. *Adv. Energy Mater.* **2023**, *13* (34), 1–9. <https://doi.org/10.1002/aenm.202301530>.
- (37) Driscoll, L. L.; Jarvis, A.; Madge, R.; Driscoll, E. H.; Price, J. M.; Sommerville, R.; Tontini, F. S.; Bahri, M.; Miah, M.; Mehdi, B. L.; Kendrick, E.; Browning, N. D.; Allan, P. K.; Anderson, P. A.; Slater, P. R. Phase-Selective Recovery and Regeneration of End-of-Life Electric Vehicle Blended Cathodes via Selective Leaching and Direct Recycling. *Joule* **2024**, *8* (10), 2735–2754. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2024.07.001>.
- (39) Nagler, F.; Christian, N.; Daubinger, P.; Flegler, A.; Hofmann, M.; Giffin, G. A. Unraveling the Importance of Water Ratio in Direct Lithium-Ion Battery Cathode Recycling. *J. Power Sources Adv.* **2023**, *24* (August), 100131. <https://doi.org/10.1016/j.powera.2023.100131>.
- (40) Nagler, F.; Christian, N.; Kolb, L.; Flegler, A.; Hofmann, M.; Giffin, G. A. Influence of Process Conditions during Aqueous and Direct Recycling of NMC811 Cathodes. *ECS Meet. Abstr.* **2023**, *MA2023-02* (2), 152–152. <https://doi.org/10.1149/ma2023-022152mtgabs>.
- <https://doi.org/10.3390/batteries7020029>.
- (43) Gao, H.; Han, B.; Tran, D.; Zhang, L.; Zhao, Z.; Chen, Y. T.; Tang, W.; Xu, M.; Wu, J.; Yu, X.; Gupta, V.; Appleberry, M.; Liu, H.; Yin, Y.; Yao, W.; Li, M.; Li, W.; Mu, L.; Meng, Y. S.; Chen, Z. Understanding

and Controlling Structural Defects and Disorder in LiNi<sub>0.5</sub>Mn<sub>1.5</sub>O<sub>4</sub> Cathodes for Direct Recycling. *ACS Nano* **2024**. <https://doi.org/10.1021/acsnano.4c10164>.

- (44) Wang, Q.; Zhang, H.; Cui, Z.; Zhou, Q.; Shangguan, X.; Tian, S.; Zhou, X.; Cui, G. Siloxane-Based Polymer Electrolytes for Solid-State Lithium Batteries. *Energy Storage Mater.* **2019**, *23* (April), 466–490. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.04.016>.
- (45) Borah, M.; Wang, Q.; Moura, S.; Sauer, D. U.; Li, W. Synergizing Physics and Machine Learning for Advanced Battery Management. *Commun. Eng.* **2024**, *3* (1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s44172-024-00273-6>.
- (46) Saleem, U.; Wilhelms, A.; Sottmann, J.; Knuutila, H. K. Direct Lithium Extraction ( DLE ) Methods and Their Potential in Li-Ion. *Sep. Purif. Technol.* **2024**, 131315. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.131315>.
- (49) Sudarta. 濟無No Title No Title No Title. **2022**, *16* (1), 1–23.
- (50) Liu, X.; Wang, R.; Liu, S.; Pu, J.; Xie, H.; Wu, M.; Liu, D.; Li, Y.; Liu, J. Organic Eutectic Salts-Assisted Direct Lithium Regeneration for Extremely Low State of Health Ni-Rich Cathodes. *Adv. Energy Mater.* **2023**, *13* (44), 1–12. <https://doi.org/10.1002/aenm.202302987>.
- (51) Mayyas, A.; Steward, D.; Mann, M. The Case for Recycling: Overview and Challenges in the Material Supply Chain for Automotive Li-Ion Batteries. *Sustain. Mater. Technol.* **2019**, *19*, e00087. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2018.e00087>.
- (52) Xu, P.; Tan, D. H. S.; Jiao, B.; Gao, H.; Yu, X.; Chen, Z. A Materials Perspective on Direct Recycling of Lithium-Ion Batteries: Principles, Challenges and Opportunities. *Adv. Funct. Mater.* **2023**, *33* (14), 1–20. <https://doi.org/10.1002/adfm.202213168>.
- (54) Kordloo, M.; Khodadadmahmoudi, G.; Barati, M. R.; Rezaei, A. Effect of Leaching Media on Selective Precipitation of Al, Ni, Co, and Mn in the NMC Battery Recycling Process. *Sep. Purif. Technol.* **2025**, *363* (P3), 132093. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.132093>.
- (55) Wang, Y.; Shen, K.; Yuan, C. A Sustainable Direct Recycling Method for LMO/NMC Cathode Mixture from Retired Lithium-Ion Batteries in EV. *Energy Environ. Mater.* **2025**, *8* (4), 1–8. <https://doi.org/10.1002/eem2.12863>.
- (56) AVCI, G.; ÖZDEMİR, A. Atık LFP Bataryaların Geri Dönüşümü. *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.* **2023**, *11* (4), 997–1023. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1332596>.
- (59) Lim, J.; Jang, Y.; Lee, J.; Lee, C.; Jbari, O.; Kwon, K.; Chung, E. Hydrometallurgical Process of Spent Lithium-Ion Battery Recycling Part. 2 Recovery of Valuable Metals from the Cathode Active Material Leachates: Review and Cost Analysis. *Hydrometallurgy* **2025**, *236* (December 2024). <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2025.106516>.
- (60) Matras, D.; Ashton, T. E.; Dong, H.; Mirolo, M.; Martens, I.; Drnec, J.; Darr, J. A.; Quinn, P. D.; Jacques, S. D. M.; Beale, A. M.; Vamvakeros, A. Emerging Chemical Heterogeneities in a Commercial 18650 NCA Li-Ion Battery during Early Cycling Revealed by Synchrotron X-Ray Diffraction Tomography. *J. Power Sources* **2022**, *539* (September 2021), 231589. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231589>.
- (61) González-Aguilera, L.; Vicent-Luna, J. M.; Ferrer, M. L.; Monte, F. del; Gutiérrez, M. C. DES-Based Leachates Containing LCO, NMC or NCA Oxides as Electrolytes for 2.2 V Supercapacitors. *Chem. Eng. J.* **2025**, *506* (November 2024). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.159839>.

- (62) Zou, Y.; Xiao, Y.; Tang, Y.; Cheng, Y.; Sun, S. G.; Wang, M. S.; Yang, Y.; Zheng, J. Synergetic LaPO<sub>4</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Hybrid Coating Strengthens the Interfacial Stability of LiCoO<sub>2</sub> at 4.6 V. *J. Power Sources* **2023**, *555* (September 2022). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232409>.
- (63) Kang, R.; Jia, C.; Zhao, J.; Zhao, L.; Zhang, J. Effects of Capacity on the Thermal Runaway and Gas Venting Behaviors of Large-Format Lithium Iron Phosphate Batteries Induced by Overcharge. *J. Energy Storage* **2024**, *87* (March), 111523. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111523>.
- (64) Rechkemmer, S. K.; Zang, X.; Zhang, W.; Sawodny, O. Calendar and Cycle Aging Study of a Commercial LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Cell under Consideration of Influences by Cell Progress. *J. Energy Storage* **2020**, *30* (May), 101547. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101547>.
- (65) Luh, M.; Blank, T. Comprehensive Battery Aging Dataset: Capacity and Impedance Fade Measurements of a Lithium-Ion NMC/C-SiO Cell. *Sci. Data* **2024**, *11* (1), 1–21. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03831-x>.
- (66) Xiang, J.; Wei, Y.; Zhong, Y.; Yang, Y.; Cheng, H.; Yuan, L.; Xu, H.; Huang, Y. Building Practical High-Voltage Cathode Materials for Lithium-Ion Batteries. *Adv. Mater.* **2022**, *34* (52), 1–18. <https://doi.org/10.1002/adma.202200912>.
- (67) Luu, N. S.; Park, K. Y.; Hersam, M. C. Characterizing and Mitigating Chemomechanical Degradation in High-Energy Lithium-Ion Battery Cathode Materials. *Accounts Mater. Res.* **2022**, *3* (5), 511–524. <https://doi.org/10.1021/accounts.1c00282>.
- (68) Konarov, A.; Myung, S. T.; Sun, Y. K. Cathode Materials for Future Electric Vehicles and Energy Storage Systems. *ACS Energy Lett.* **2017**, *2* (3), 703–708. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.7b00130>.
- (69) Xu, J.; Hu, H.; Zhu, L.; Li, X.; Xiao, L.; Jung, J. C. Y.; Zhang, R.; Sui, P. C. Pore-Scale Modeling and Investigation on the Effect of Calendering on Lithium-Ion Battery Cathodes. *J. Energy Storage* **2024**, *77* (December 2023), 109939. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109939>.
- (73) Liao, H.; Zhao, S.; Cai, M.; Dong, Y.; Huang, F. Direct Conversion of Waste Battery Cathodes to High-Volumetric-Capacity Anodes with Assembled Secondary-Particle Morphology. *Adv. Energy Mater.* **2023**, *13* (22), 1–10. <https://doi.org/10.1002/aenm.202300596>.
- (74) Tao, R.; Xing, P.; Li, H.; Cun, Z.; Sun, Z.; Wu, Y. In Situ Reduction of Cathode Material by Organics and Anode Graphite without Additive to Recycle Spent Electric Vehicle LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Batteries. *J. Power Sources* **2022**, *520* (November 2021), 230827. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230827>.
- (75) Saju, S. K.; Chattopadhyay, S.; Xu, J.; Alhashim, S.; Pramanik, A.; Ajayan, P. M. Hard Carbon Anode for Lithium-, Sodium-, and Potassium-Ion Batteries: Advancement and Future Perspective. *Cell Reports Phys. Sci.* **2024**, *5* (3), 101851. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2024.101851>.
- (76) Zhang, H.; Yang, Y.; Ren, D.; Wang, L.; He, X. Graphite as Anode Materials: Fundamental Mechanism, Recent Progress and Advances. *Energy Storage Mater.* **2021**, *36* (December 2020), 147–170. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2020.12.027>.
- (80) Li, L.; Dunn, J. B.; Zhang, X. X.; Gaines, L.; Chen, R. J.; Wu, F.; Amine, K. Recovery of Metals from Spent Lithium-Ion Batteries with Organic Acids as Leaching Reagents and Environmental Assessment. *J. Power Sources* **2013**, *233*, 180–189. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.12.089>.
- (81) Hu, Y.; Cheng, H.; Tao, S. Retired Electric Vehicle (EV) Batteries: Integrated Waste Management and Research Needs. *Environ. Sci. Technol.* **2017**, *51* (19), 10927–10929. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04207>.

- (82) Gloria Kang GJ, Ewing-Nelson SR, Mackey L, Schlitt JT, Marathe A, Abbas KM, S. S. 乳鼠心肌提取 HHS Public Access. *Physiol. Behav.* **2018**, *176* (1), 139–148. <https://doi.org/10.1021/es400614y.Potential>.
- (86) Zeng, X.; Li, J. Implications for the Carrying Capacity of Lithium Reserve in China. *Resour. Conserv. Recycl.* **2013**, *80* (1), 58–63. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.08.003>.
- (87) Wilburn, D. R. Material Use in the United States--Selected Case Studies for Cadmium, Cobalt, Lithium, and Nickel in Rechargeable Batteries. *US Geol. Surv. Sci. Investig. Rep.* **2008**, No. 5141, 1–43.
- (88) Zheng, R.; Zhao, L.; Wang, W.; Liu, Y.; Ma, Q.; Mu, D.; Li, R.; Dai, C. Optimized Li and Fe Recovery from Spent Lithium-Ion Batteries: Via a Solution-Precipitation Method. *RSC*
- (92) Gerold, E.; Schinnerl, C.; Antrekowitsch, H. Critical Evaluation of the Potential of Organic Acids for the Environmentally Friendly Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries. *Recycling* **2022**, *7* (1). <https://doi.org/10.3390/recycling7010004>.
- .; Wu, Y.; Takacs, C. J.; Salleo, A.; Giovannitti, A. Redox-Active Polymers Designed for the Circular Economy of Energy Storage Devices. *ACS Energy Lett.* **2021**, *6* (10), 3450–3457. <https://doi.org/10.1021/acsenerylett.1c01625>.
- (96) Natarajan, S.; Akshay, M.; Aravindan, V. Recycling/Reuse of Current Collectors from Spent Lithium-Ion Batteries: Benefits and Issues. *Adv. Sustain. Syst.* **2022**, *6* (3), 1–8. <https://doi.org/10.1002/adsu.202100432>.
- (97) Progress Update Summer 2024 Bipartisan Infrastructure Law ve Inflation Reduction Act Funding Progress Update - Summer 2024. **2024**.
- (99) Sun, L.; Qiu, K. Vacuum Pyrolysis and Hydrometallurgical Process for the Recovery of Valuable Metals from Spent Lithium-Ion Batteries. *J. Hazard. Mater.* **2011**, *194*, 378–384. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.07.114>.
- (100) Meshram, P.; Abhilash; Pandey, B. D.; Mankhand, T. R.; Deveci, H. Comparison of Different Reductants in Leaching of Spent Lithium Ion Batteries. *Jom* **2016**, *68* (10), 2613–2623. <https://doi.org/10.1007/s11837-016-2032-9>.
- (101) Gao, R.; Sun, C.; Zhou, T.; Zhuang, L.; Xie, H. Recycling of LiNi<sub>0.5</sub>Co<sub>0.2</sub>Mn<sub>0.3</sub>O<sub>2</sub> Material from Spent Lithium-Ion Batteries Using Mixed Organic Acid Leaching and Sol-Gel Method. *ChemistrySelect* **2020**, *5* (21), 6482–6490. <https://doi.org/10.1002/slct.202001843>.
- (103) Alhashim, S. H.; Bhattacharyya, S.; Ajayan, P. M. Microwave Assisted Ultrafast, Selective Lithium Extraction in Deep Eutectic Solvent for LIB Cathode Recycling. *Adv. Funct. Mater.* **2024**, *2404570*, 1–7. <https://doi.org/10.1002/adfm.202404570>.
- (104) Lee, C. K.; Rhee, K. I. Reductive Leaching of Cathodic Active Materials from Lithium Ion Battery Wastes. *Hydrometallurgy* **2003**, *68* (1–3), 5–10. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(02\)00167-6](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(02)00167-6).
- (105) Sun, C.; Xu, L.; Chen, X.; Qiu, T.; Zhou, T. Sustainable Recovery of Valuable Metals from Spent Lithium-Ion Batteries Using DL-Malic Acid: Leaching and Kinetics Aspect. *Waste Manag. Res.* **2018**, *36* (2), 113–120. <https://doi.org/10.1177/0734242X17744273>.
- (109) Larouche, F.; Tedjar, F.; Amouzegar, K.; Houlachi, G.; Bouchard, P.; Demopoulos, G. P.; Zaghbi, K. Progress and Status of Hydrometallurgical and Direct Recycling of Li-Ion Batteries and Beyond. *Materials (Basel)*. **2020**, *13* (3). <https://doi.org/10.3390/ma13030801>.

- (110) Gruber, P. W.; Medina, P. A.; Keoleian, G. A.; Kesler, S. E.; Everson, M. P.; Wallington, T. J. Global Lithium Availability: A Constraint for Electric Vehicles? *J. Ind. Ecol.* **2011**, *15* (5), 760–775. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00359.x>.
- (111) Xu, J.; Thomas, H. R.; Francis, R. W.; Lum, K. R.; Wang, J.; Liang, B. A Review of Processes and Technologies for the Recycling of Lithium-Ion Secondary Batteries. *J. Power Sources* **2008**, *177* (2), 512–527. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.11.074>.
- (112) Bernardes, A. M.; Espinosa, D. C. R.; Tenório, J. A. S. Recycling of Batteries: A Review of Current Processes and Technologies. *J. Power Sources* **2004**, *130* (1–2), 291–298. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2003.12.026>.
- (113) Colarullo, L.; Thakur, J. Second-Life EV Batteries for Stationary Storage Applications in Local Energy Communities. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2022**, *169* (February), 112913. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112913>.
- (114) Fan, E.; Li, L.; Wang, Z.; Lin, J.; Huang, Y.; Yao, Y.; Chen, R.; Wu, F. Sustainable Recycling Technology for Li-Ion Batteries and Beyond: Challenges and Future Prospects. *Chem. Rev.* **2020**, *120* (14), 7020–7063. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00535>.
- (115) Liao, S.; Qin, L.; Niu, Y.; Xie, M.; Liu, R.; Bu, Z.; Fu, H.; Meng, X.; Zhang, W.; Liu, G.; Hu, Y.; Li, Q. From Spent Lithium-Ion Batteries to High-Performance Supercapacitors: Enabling Universal Gradient Recycling via Spin Capacitance. *Adv. Energy Mater.* **2024**, *2403970*, 1–11. <https://doi.org/10.1002/aenm.202403970>.
- (118) Chernyaev, A.; Zhang, J.; Seisko, S.; Louhi-Kultanen, M.; Lundström, M. Fe<sup>3+</sup> and Al<sup>3+</sup> Removal by Phosphate and Hydroxide Precipitation from Synthetic NMC Li-Ion Battery Leach Solution. *Sci. Rep.* **2023**, *13* (1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48247-6>.
- (119) Kang, J.; Senanayake, G.; Sohn, J.; Shin, S. M. Recovery of Cobalt Sulfate from Spent Lithium Ion Batteries by Reductive Leaching and Solvent Extraction with Cyanex 272. *Hydrometallurgy* **2010**, *100* (3–4), 168–171. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2009.10.010>.
- (120) Islam, M. T.; Ali, A.; Abdul Qadir, S.; Shahid, M. Policy and Regulatory Perspectives of Waste Battery Management and Recycling: A Review and Future Research Agendas. *Waste Manag. Bull.* **2025**, *3* (1), 301–331. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2025.01.011>.
- (125) Huijbregts, M. A. J.; Hellweg, S.; Frischknecht, R.; Hendriks, H. W. M.; Hungebühler, K.; Hendriks, A. J. Cumulative Energy Demand as Predictor for the Environmental Burden of Commodity Production. *Environ. Sci. Technol.* **2010**, *44* (6), 2189–2196. <https://doi.org/10.1021/es902870s>.
- (126) Rajaeifar, M. A.; Raugei, M.; Steubing, B.; Hartwell, A.; Anderson, P. A.; Heidrich, O. Life Cycle Assessment of Lithium-Ion Battery Recycling Using Pyrometallurgical Technologies. *J. Ind. Ecol.* **2021**, *25* (6), 1560–1571. <https://doi.org/10.1111/jiec.13157>.
- (127) Zhao, Z.; Li, Y.; Chen, Z.; Li, C.; Zeng, H.; Du, C.; Li, T. Value-Added Recycling of Spent LiFePO<sub>4</sub> by a FeCl<sub>3</sub> Leaching-Spray Pyrolysis Approach. *J. Power Sources* **2025**, *628* (October 2024). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.235939>.
- (135) Li, S.; Wu, Z.; Zhang, M.; Xu, J.; Jin, Z.; Gan, Y.; Xu, Z.; Wang, Q.; Zhang, W.; Xia, Y.; He, X.; Zhang, J. Direct Recycling of Cathode Materials from Spent Lithium-Ion Batteries: Principles, Strategies, and Perspectives. *Chem. - A Eur. J.* **2025**, *31* (17). <https://doi.org/10.1002/chem.202404461>.
- (136) Reinhart, L.; Vrucak, D.; Woeste, R.; Lucas, H.; Rombach, E.; Friedrich, B.; Letmathe, P. Pyrometallurgical Recycling of Different Lithium-Ion Battery Cell Systems: Economic and Technical



Analysis. *J. Clean. Prod.* **2023**, *416* (April 2022), 137834. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137834>.

- (137) He, Y.; Zhang, T.; Wang, F.; Zhang, G.; Zhang, W.; Wang, J. Recovery of LiCoO<sub>2</sub> and Graphite from Spent Lithium-Ion Batteries by Fenton Reagent-Assisted Flotation. *J. Clean. Prod.* **2017**, *143*, 319–325. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.106>.
- (147) Septioga, K.; Fajar, A. T. N.; Wakabayashi, R.; Goto, M. Deep Eutectic Solvent-Aqueous Two-Phase Leaching System for Direct Separation of Lithium and Critical Metals. *ACS Sustain. Resour. Manag.* **2024**, *1* (11), 2482–2491. <https://doi.org/10.1021/acssusresmg.4c00339>.
- (148) Zheng, S.; Xu, S.; Wang, Z.; Duan, H.; Chen, D.; Long, M.; Li, Y. Efficient Leaching of Valuable Metals from Spent Lithium-Ion Batteries Using Green Deep Eutectic Solvents: Process Optimization, Mechanistic Analysis, and Environmental Impact Assessment. *J. Clean. Prod.* **2024**, *480* (October), 144128. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144128>.
- (149) Li, C.; Jin, J.; Yuan, Z.; Zhang, C.; Wu, L. A Review on Leaching of Spent Lithium Battery Cathode Materials Adopting Deep Eutectic Solvents. **2024**, 202400258. <https://doi.org/10.1002/open.202400258>.
- (150) Punt, T.; Bradshaw, S. M.; van Wyk, P.; Akdogan, G. The Efficiency of Black Mass Preparation by Discharge and Alkaline Leaching for LIB Recycling. *Minerals* **2022**, *12* (6). <https://doi.org/10.3390/min12060753>.
- (151) Ye, J.; Chen, J.; Luo, K.; Yan, F.; Zhang, W.; Ren, X.; Li, J.; Rong, H. The Leaching Model and Leaching Kinetics of Lithium Slag in Alkaline Solution. *Constr. Build. Mater.* **2024**, *432* (April), 136642. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136642>.
- (152) Maryam Sadeghi, S.; Vanpeteghem, G.; Neto, I. F. F.; Soares, H. M. V. M. Selective Leaching of Zn from Spent Alkaline Batteries Using Environmentally Friendly Approaches. *Waste Manag.* **2017**, *60*, 696–705. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.12.002>.
- (153) Nayl, A. A.; Elkhashab, R. A.; Badawy, S. M.; El-Khateeb, M. A. Acid Leaching of Mixed Spent Li-Ion Batteries. *Arab. J. Chem.* **2017**, *10*, S3632–S3639. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.04.001>.
- (154) Gao, W.; Liu, C.; Cao, H.; Zheng, X.; Lin, X.; Wang, H.; Zhang, Y.; Sun, Z. Comprehensive Evaluation on Effective Leaching of Critical Metals from Spent Lithium-Ion Batteries. *Waste Manag.* **2018**, *75* (2018), 477–485. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.02.023>.
- (155) Zheng, Q.; Watanabe, M.; Iwatate, Y.; Azuma, D.; Shibasaki, K.; Hiraga, Y.; Kishita, A.; Nakayasu, Y. Hydrothermal Leaching of Ternary and Binary Lithium-Ion Battery Cathode Materials with Citric Acid and the Kinetic Study. *J. Supercrit. Fluids* **2020**, *165*, 104990. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2020.104990>.
- <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2023.100068>.
- (161) Ganter, M. J.; Landi, B. J.; Babbitt, C. W.; Anctil, A.; Gaustad, G. Cathode Refunctionalization as a Lithium Ion Battery Recycling Alternative. *J. Power Sources* **2014**, *256*, 274–280. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.01.078>.
- (162) Wang, T.; Luo, H.; Bai, Y.; Belharouak, I.; Jayanthi, K.; Paranthaman, M. P.; Manard, B. T.; Wang, E. T. H.; Dogan, F.; Son, S. B.; Ingram, B. J.; Dai, Q.; Dai, S. Direct Recycling of Spent Nickel-Rich Cathodes in Reciprocal Ternary Molten Salts. *J. Power Sources* **2024**, *593* (July 2023), 233798. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233798>.

- (163) Wagner-Wenz, R.; Teppala, D. T.; Necke, T.; Brückner, F.; Fabian, A.; Horn, D.; Woth, J.; Zimmermann, J.; Balke-Grünwald, B.; Weidenkaff, A.; Ionescu, E. Removal and Recovery of Phosphorus and Fluorine in Process Water from Water Based Direct Physical Lithium-Ion Battery Recycling. *Water Res.* **2025**, *268* (August 2024), 0–7. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122476>.
- (164) Li, H.; Ren, Y.; Yang, P.; Jian, Z.; Wang, W.; Xing, Y.; Zhang, S. Morphology and Size Controlled Synthesis of the Hierarchical Structured  $\text{Li}_{1.2}\text{Mn}_{0.54}\text{Ni}_{0.13}\text{Co}_{0.13}\text{O}_2$  Cathode Materials for Lithium Ion Batteries. *Electrochim. Acta* **2019**, *297*, 406–416. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.10.195>.
- (165) Beletskii, E. V.; Romanovski, V. Direct Plasma Solution Recycling of Cathode Materials for Lithium-Ion Batteries with Simultaneous Removal of Contaminants and Relithiation. *J. Power Sources* **2024**, *624* (September), 235576. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.235576>.
- (166) Jing, Q.; Zhang, J.; Liu, Y.; Zhang, W.; Chen, Y.; Wang, C. Direct Regeneration of Spent  $\text{LiFePO}_4$  Cathode Material by a Green and Efficient One-Step Hydrothermal Method. *ACS Sustain. Chem. Eng.* **2020**, *8* (48), 17622–17628. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c07166>.
- (167) Gao, H.; Han, B.; Tran, D.; Zhang, L.; Zhao, Z.; Chen, Y. T.; Tang, W.; Xu, M.; Wu, J.; Yu, X.; Gupta, V.; Appleberry, M.; Liu, H.; Yin, Y.; Yao, W.; Li, M.; Li, W.; Mu, L.; Meng, Y. S.; Chen, Z. Understanding and Controlling Structural Defects and Disorder in  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$  Cathodes for Direct Recycling. *ACS Nano* **2024**, *18* (44), 30737–30748. <https://doi.org/10.1021/acsnano.4c10164>.
- (168) Ju, X.; Huang, H.; He, W.; Zheng, H.; Deng, P.; Li, S.; Qu, B.; Wang, T. Surfactant-Assisted Synthesis of High Energy {010} Facets Beneficial to Li-Ion Transport Kinetics with Layered  $\text{LiNi}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_2$ . *ACS Sustain. Chem. Eng.* **2018**, *6* (5), 6312–6320. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b00126>.
- (169) Gao, H.; Yan, Q.; Xu, P.; Liu, H.; Li, M.; Liu, P.; Luo, J.; Chen, Z. Efficient Direct Recycling of Degraded  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  Cathodes by One-Step Hydrothermal Relithiation. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2020**, *12* (46), 51546–51554. <https://doi.org/10.1021/acsmi.0c15704>.
- (170) Okuno, Y. Structures and Ion Transport Properties of Hydrate-Melt Electrolytes: A Machine-Learning Potential Molecular Dynamics Study. *J. Phys. Chem. B* **2025**, *129* (14), 3639–3651. <https://doi.org/10.1021/acs.jpccb.4c07559>.
- (176) Shi, G.; Cheng, J.; Wang, J.; Zhang, S.; Shao, X.; Chen, X.; Li, X.; Xin, B. A Comprehensive Review of Full Recycling and Utilization of Cathode and Anode as Well as Electrolyte from Spent Lithium-Ion Batteries. *J. Energy Storage* **2023**, *72* (PC), 108486. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108486>.
- (177) Niu, B.; Xu, Z.; Xiao, J.; Qin, Y. Recycling Hazardous and Valuable Electrolyte in Spent Lithium-Ion Batteries: Urgency, Progress, Challenge, and Viable Approach. *Chem. Rev.* **2023**, *123* (13), 8718–8735. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.3c00174>.
- (178) Mönnighoff, X.; Friesen, A.; Konersmann, B.; Horsthemke, F.; Grütze, M.; Winter, M.; Nowak, S. Supercritical Carbon Dioxide Extraction of Electrolyte from Spent Lithium Ion Batteries and Its Characterization by Gas Chromatography with Chemical Ionization. *J. Power Sources* **2017**, *352*, 56–63. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.114>.
- (179) Brückner, L.; Frank, J.; Elwert, T. Industrial Recycling of Lithium-Ion Batteries—A Critical Review of Metallurgical Process Routes. *Metals (Basel)*. **2020**, *10* (8), 1–29. <https://doi.org/10.3390/met10081107>.
- (180) He, B.; Zheng, H.; Tang, K.; Xi, P.; Li, M.; Wei, L.; Guan, Q. A Comprehensive Review of Lithium-Ion Battery (LiB) Recycling Technologies and Industrial Market Trend Insights. *Recycling* **2024**, *9* (1). <https://doi.org/10.3390/recycling9010009>.

- (181) Wu, S.; Kaden, N.; Dröder, K. A Systematic Review on Lithium-Ion Battery Disassembly Processes for Efficient Recycling. *Batteries* **2023**, *9* (6). <https://doi.org/10.3390/batteries9060297>.
- (189) Zeng, Z.; Xu, P.; Li, J.; Yi, C.; Zhao, W.; Sun, W.; Ji, X.; Yang, Y.; Ge, P. Large-Scale and Homogenized Strategies of Spent LiFePO<sub>4</sub> Recycling: Reconstruction of Targeted Lattice. *Adv. Funct. Mater.* **2024**, *34* (6), 1–18. <https://doi.org/10.1002/adfm.202308671>.
- (190) Liang, Z.; Cai, C.; Peng, G.; Hu, J.; Hou, H.; Liu, B.; Liang, S.; Xiao, K.; Yuan, S.; Yang, J. Hydrometallurgical Recovery of Spent Lithium Ion Batteries: Environmental Strategies and Sustainability Evaluation. *ACS Sustain. Chem. Eng.* **2021**, *9* (17), 5750–5767. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c00942>.
- (191) Bai, X.; Jiang, Z.; Sun, Y.; Liu, X.; Jin, X.; He, R.; Liu, Z.; Pan, J. Clean Universal Solid-State Recovery Method of Waste Lithium-Ion Battery Ternary Positive Materials and Their Electrochemical Properties. *ACS Sustain. Chem. Eng.* **2023**, *11* (9), 3673–3686. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c06630>.
- (192) Arshad, F.; Li, L.; Amin, K.; Fan, E.; Manurkar, N.; Ahmad, A.; Yang, J.; Wu, F.; Chen, R. A Comprehensive Review of the Advancement in Recycling the Anode and Electrolyte from Spent Lithium Ion Batteries. *ACS Sustain. Chem. Eng.* **2020**, *8* (36), 13527–13554. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c04940>.
- (193) Zheng, Y.; Long, H. L.; Zhou, L.; Wu, Z. S.; Zhou, X.; You, L.; Yang, Y.; Liu, J. W. Leaching Procedure and Kinetic Studies of Cobalt in Cathode Materials from Spent Lithium Ion Batteries Using Organic Citric Acid as Leachant. *Int. J. Environ. Res.* **2016**, *10* (1), 159–168.
- (194) Bhuyan, M. S. A.; Shin, H. Green Recovery of Cathode Active Materials from Li-Ion Battery Electrode Scraps Using Propylene Carbonate: A Novel Approach for Direct Recycling. *ACS Sustain. Chem. Eng.* **2023**, *11* (29), 10677–10687. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c01278>.
- (195) Gupta, S.; Carrizosa, S. B.; Aberg, B. Designing High-Performance Asymmetric and Hybrid Energy Devices via Merging Supercapacitive/Pseudocapacitive and Li-Ion Battery Type Electrodes. *Sci. Rep.* **2024**, *14* (1), 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-79622-6>.
- (196) Geslin, A.; Xu, L.; Ganapathi, D.; Moy, K.; Chueh, W.; Onori, S. Dynamic Cycling Enhances Battery Lifetime. **2024**, No. June, 44–48. <https://doi.org/10.1038/s41560-024-01675-8>.
- (197) Georgi-Maschler, T.; Friedrich, B.; Weyhe, R.; Heegn, H.; Rutz, M. Development of a Recycling Process for Li-Ion Batteries. *J. Power Sources* **2012**, *207*, 173–182. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.01.152>.
- (198) Sun, L.; Qiu, K. Organic Oxalate as Leachant and Precipitant for the Recovery of Valuable Metals from Spent Lithium-Ion Batteries. *Waste Manag.* **2012**, *32* (8), 1575–1582. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.03.027>.
- (199) Zheng, Y.; Song, W.; Mo, W. T.; Zhou, L.; Liu, J. W. Lithium Fluoride Recovery from Cathode Material of Spent Lithium-Ion Battery. *RSC Adv.* **2018**, *8* (16), 8990–8998.



# Bölüm 15

## GÜNÜMÜZDE ENDÜSTRİ 4.0 - YAPAY ZEKA İLİŞKİSİ VE ÖNEMİ: SEKTÖREL İNCELEME

*KASIM BAYNAL<sup>1</sup>, ESRA DEMİR<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Kocaeli Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0003-1448-5937  
<sup>2</sup> Kocaeli Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0009-0006-2645-5857

## GİRİŞ

Tarihsel süreçte gerçekleşen bilimsel ve teknolojik gelişmeler, üretim sistemlerini yapısal ve operasyonel açıdan etkileyerek dört büyük endüstri devriminin ortaya çıkmasına zemin hazırlamıştır. Üretim paradigmasındaki her bir teknolojik atılım; üretim süreçlerinin dönüşümüne neden olmuş ve bu kırılmalar, sırasıyla bir sonraki endüstri devriminin oluşum dinamiklerini şekillendirmiştir.

Birinci sanayi devrimi olarak tanımlanan Endüstri 1.0, üretimde insan ve hayvan kas gücüne dayalı emeğin yerini, su ve buhar gücüyle çalışan makinelerin alması ve bu makinelerin endüstriyel ölçekte yaygınlaşmasıyla ortaya çıkmıştır. 19. yüzyılın son çeyreğine gelindiğinde elektrik enerjisinin üretim süreçlerine entegre edilmesiyle ise Endüstri 2.0 dönemi başlatılmıştır. Elektrifikasyon temelli bu devrim, üretim hatlarının otomasyonu ve montaj hattı sistemlerinin yaygınlaşmasıyla kitlesel üretimi uygulanabilir hâle getirmiş; iş bölümü, verimlilik, standardizasyon ve ölçek ekonomisi gibi kavramların sanayi üretiminin ana tasarım ilkeleri olarak yerleşmesine öncülük etmiştir.

Endüstri 3.0 ise elektrik enerjisinin yanı sıra bilgi ve iletişim teknolojilerinin üretim süreçlerine dâhil edilmesiyle şekillenmiştir. Bu aşamada otomasyon sistemleri gelişmiş ve üretim süreçlerinde dijitalleşme hız kazanmıştır.

2000’li yıllara gelindiğinde fiziksel ve dijital bileşenlerin siber-fiziksel sistemler aracılığıyla eş zamanlı ve etkileşimli biçimde çalışabildiği akıllı üretim ekosistemlerine geçişle birlikte Endüstri 4.0 süreci konuşulmaya başlanmıştır. Endüstri 4.0, birbiriyle bağlantılı tüm üretim sistemlerinin teknoloji ile bütünleşerek gerçekte ve sanal ortamda etkileşimli olarak kesintisiz çalışmasını amaçlamaktadır. Bu bağlamda, üretim süreçlerinin “akıllı” olarak nitelendirilmesi; sistemlerin yalnızca bağlantılı olmasını değil, aynı zamanda öğrenme, çıkarım yapma ve karar verme kapasitesine sahip olmasını da gerektirmektedir.

Yapay zekâ (YZ) teknolojileri, Endüstri 4.0’ın ihtiyaç duyduğu bu bilişsel yetkinliklerin sağlanmasında kritik bir rol üstlenmektedir. Geçmiş verilerden öğrenebilen, dış müdahaleye ihtiyaç duymaksızın karar alıp bu kararları uygulayabilen otonom sistemlerin tasarımı, YZ algoritmalarının üretim ortamlarına etkin entegrasyonunu zorunlu kılmaktadır.

## YAPAY ZEKA KAVRAMI VE TARİHSEL GELİŞİMİ

Günümüzde birçok alanda kendine yer bulan YZ’nın başlangıç çalışmalarının, ünlü sanatçı Leonardo da Vinci’ye ilham kaynağı olduğu düşünülen İsmâil bin er-Rezzâz el-Cezerî’nin (1136-1206) yaptığı robot çizimleri olduğu kabul edilir. Ancak modern anlamda YZ çalışmaları İkinci Dünya Savaşı ile birlikte önem kazanmaya başlamıştır. Özellikle savaş yıllarında Alan Mathison Turing’in “Bombe” olarak adlandırdığı ilk tam otomatik kod kırma makinesini icat etmesi o zamanların şartlarında önemli sayılabilecek bir gelişmedir (Acar, 2020). Bu gelişmeden sonra Alan Turing, YZ alanında ilk defa YZ ile bilgisayar programlarının birleştirilerek akıllı makinelerin icat edilebileceğini açıkladığı bir konferans vermiş (McCarthy, 2007, s. 1174) ve 1950 yılında yayınladığı “Bilgi İşlem Makineleri ve

Zeka” (Computing Machinery and Intelligence) makalesinde “Makineler düşünebilir mi?” sorusuna cevap arayarak YZ’nın düşünsel temellerini atmıştır (Turing, 1980, s. 23).

Alan Turing YZ’nın fikir babası olarak kabul edilse de “yapay zeka” (artificial intelligence) terimi ilk defa, 1956 yılında Dartmouth Koleji’nde John McCarthy tarafından YZ üzerine düzenlenen bir konferansta kullanılmıştır. Bu konferansın devamında YZ üzerine çalışmalar hız kazanmış ve sırasıyla Aziz (1961), Benzeşim (1963), Eliza (1965), Bilgin (1970) ve Stajyer (1979) gibi önemli YZ programları geliştirilmiştir (Kutlusoy, 2019). İnsana benzeyen ilk akıllı robot ise WABOT-I adıyla 1972 yılında Japonya’da yapılmıştır (Acar, 2020).

1974-1980 yılları arasında devletler, YZ alanındaki çalışmalarını olumsuz yönde eleştiren yayınların artmasından etkilenerek çalışmalara fon ayırmaktan vazgeçmişlerdir. Bu dönem “Yapay Zeka Kışı” (Artificial Intelligence Winter) olarak adlandırılmaktadır. 1980’li yıllarda Japonya ile rekabet etmek amacıyla YZ çalışmalarına yeniden destek vermeye başlayan İngiltere, tekrar bu alanda hareketliliğe sebep olmuştur (Öztürk ve Şahin, 2018, s. 23-24).

1997 yılında IBM tarafından geliştirilen “Deep Blue” adlı bilgisayar, dünya satranç şampiyonu Garry Kasparov ile yaptığı ilk karşılaşmada berabere kalarak YZ alanında önemli bir dönüm noktası oluşturmuş ve kamuoyunda geniş yankı uyandırmıştır. Çok geçmeden saniyede 200 milyon hamle yapacak hale getirilerek ikinci maçta kazanmıştır (Schultz ve Ellen-Schultz, 2007). YZ’nın evlere girmeye başlaması ise 2000 yılının başlarına denk gelmektedir. “Roomba” isimli elektrikli süpürge üretilmesi, bu alanda farklı bir pazarın oluşmasına sebep olmuş ve peşi sıra yeni gelişmeleri tetiklemiştir.

Günümüzde YZ; deneyimlerden öğrenebilen, öğrendiklerini analiz edebilen, şekilleri, görüntü veya örüntüleri tanıyabilen, karmaşık problemlere çözümler sunabilen, çeşitli dilleri anlayarak kelimeler ile işlem yapabilen ve teknoloji dünyasına farklı bir bakış açısı kazandıran bir bilim dalı haline gelmiştir (Öztemel, 2020, s. 101).

## **ENDÜSTRİ 4.0 KAVRAMI VE TARİHSEL GELİŞİMİ**

Endüstri 4.0 veya 4. Sanayi Devrimi, tarihsel akış içerisinde otomasyonla başlayan Endüstri 3.0’ın tüm süreçlerine dijitalleşmenin entegrasyonu ile ortaya çıkmıştır. Avrupa Parlamentosunun Endüstri 4.0 tanımı şu şekildedir; "Endüstri 4.0, imalat sistemlerinin ve ürünlerin tasarımında, imalatında, işletilmesinde ve hizmetinde bir grup hızlı dönüşüme uygulanan bir terimdir. Dünyanın dördüncü sanayi devrimi, tüm dünyadaki insanların hayatını değiştiren üç eski sanayi devriminin devamı niteliğindedir." (Aydın, 2018, s. 8).

“Endüstri Devrimi” terimi, endüstrideki ekonomik ve sosyal sistemin teknolojik değişimini ifade etmektedir. Tarihsel gelişim süreçleri incelendiğinde sanayi açısından ilk hareketlenme, 18. yüzyılın ortalarında İngiltere’den başlamış ve zamanla ABD’ye yayılmıştır. Bu bağlamda giderek daha da ivme kazanan sanayileşme süreci, Almanya gibi bazı Avrupa ülkelerinde de tarımdan sanayi toplumuna geçiş sürecini başlatarak küçük işletmeleri büyük fabrikalara dönüştürmüş ve böylece

makineleşen büyük fabrikalar ilk endüstri dalgasını oluşturmuştur (Dombrowsi ve Wagner, 2014, s. 100). Özellikle 1712 yılında buhar makinesinin icat edilmesi kas gücü ile üretilen pek çok ürünün buhar gücü ile kitle halinde üretimine imkan tanımış ve böylelikle bu alanda önemli bir adım atılmıştır. Bu adım ayrıca birçok bilimsel araştırmanın da önünü açarak ikinci endüstri devrimine zemin oluşturmuştur.

İkinci endüstri devrimi süreci 19. yüzyılın sonunda Almanya'nın liderliğinde gerçekleşmiştir ve bu sürece ABD'nin de katılması, petrol kullanan makinelerin icadı ve elektrik enerjisinin işletmeler tarafından kullanılmaya başlaması ile güç kazanarak kimya, petrol, plastik ve çelik sektörlerinde hayat bulmuştur. Fabrikaların uzak pazarlara ve hammaddelere kolay ulaşım sağlama çabası sonucu demiryollarının geliştirilmesi, tüketime daha hızlı cevap verebilecek seri üretim bantlarının kurulması fikrini yaygınlaştırmıştır (Tunzelmann, 2003, s. 368).

Üçüncü sanayi devrimi süreci 20. yüzyılın son çeyreğinde ABD ve Doğu Asya'nın önderliğinde mikroişlemci, bilgi teknolojileri ve programcılığı, biyoteknoloji, nanoteknoloji ve yarı iletken alanlarındaki gelişmelerle ortaya çıkmıştır. Yeni bir kavram olarak konuşulmasından kısa bir süre sonra büyük sonuçlar vererek üretim alanlarında otomasyon süreçlerini hızlandırmış ve dolayısıyla işletmeler için yüksek verimlilik elde edilmesini sağlamıştır (Dombrowsi ve Wagner, 2014, s.101). Üçüncü sanayi devrimi bazı ülkeler ve işletmeler için hala devam etse de yaşanan gelişmelerin etkisinde 21. yüzyıl teknolojisi ile birleşerek dördüncü sanayi devrimi sürecine girilmiştir.

Endüstri 4.0 terimi, ilk olarak Almanya'da gerçekleştirilen Hannover Ticaret Fuarında tanımlanmıştır. Akıllı fabrika modelleriyle enerji, hammadde ile işgücünde daha az sarfiyat, insan hataları veya ürün kaynaklı hata ve arızaların ortadan kalkması, dolayısıyla maksimum çıktı elde edilebileceği ifade edilmiştir. Dördüncü sanayi devrimi devam etmekte olan bir süreçtir ve Nesnelerin İnterneti (IoT), Artırılmış Gerçeklik (Augmented Reality), Bulut Bilişim (Cloud Computing), Otonom Robotlar (Autonomous Robots), 3D Yazıcılar (3D Printing), Büyük Veri ve Analizi (Big Data and Analytics) gibi kavramları kapsamaktadır. (Tonga ve Tonga, 2022, s. 41).

## **YAPAY ZEKA TEMEL TEKNOLOJİLERİ**

YZ, insan zekasını taklit eden ve verilen çeşitli görevleri yerine getirebilen teknolojilerin tümünü kapsayan bir alandır. YZ, bilgisayar bilimleri ve matematiksel birtakım algoritmaların bir birleşimi olup, öğrenme, analiz etme, karar verme, problem çözme, dil işleme ve daha birçok farklı işlevi yerine getirebilecek sistemlerin geliştirilmesini amaçlar. YZ teknolojileri, farklı uygulama alanlarına ve gelişim aşamalarına göre çeşitlenmiştir. Literatürden yola çıkarak YZ teknolojilerini aşağıdaki başlıklar halinde değerlendirebiliriz.

### **Makine Öğrenimi (Machine Learning)**

YZ'nin bir alt kümesi olan makine öğrenmesi; sistemleri programlamadan "öğrenme" yeteneği kazanabilmeleri için verileri toplayarak ve işleyerek istatistiksel tekniklerin kullanılması olarak tanımlanmaktadır (Banger, 2018, s. 36). Aşağıdan yukarıya çalışma mekanizmasına sahip olan



makine öğrenmesi, sistemin içerdiği çeşitli kalıpları tespit etme, verilerden yola çıkarak istatistiksel hesaplamalarla tahminler yapma ve bu tahminler doğrultusundaki yeni bilgileri öğrenme gibi çeşitli teknikleri içerir. Bu teknikler ile bilgisayarlar, ilk defa karşılaştıkları durumlarda insanlar gibi geçmişte edindikleri deneyimleri kullanarak karar verme yetisine sahip olmaktadır (Öztuna, 2017, s. 76). Makine öğrenmesinin insan biyolojisinin iyi bir örneğini sunması, bu teknolojiyi önde gelen YZ yaklaşımlarından biri haline getirmiştir.

Makine öğreniminin üç ana türü vardır:

### **Denetimli Öğrenme (Supervised Learning)**

Sisteme veri setlerinin ve her bir veri için etiketleme sonucu oluşan etiketli veri setlerinin girilmesiyle, girdiler ve bunlara karşılık gelen çıktılar arasında bağlantı kurulur. Sonuçları bilinmeyen veri setlerine dair doğru tahminlemenin, kurulan bu bağlantı ile yapılmasına Denetimli Öğrenme denmektedir.

### **Denetimsiz Öğrenme (Unsupervised Learning)**

Denetimsiz öğrenme, sisteme dışarıdan müdahalenin olmadığı sadece girdi verilerinin sisteme girildiği makine öğrenme modelidir. Sistem, girilen veri setlerinde gizli yapıları keşfederek bağlantı kurmaya çalışmaktadır.

### **Pekiştirmeli Öğrenme (Reinforcement Learning)**

Makinenin eylemine bağlı olarak ödül veya ceza verilmesiyle en iyi eylemleri keşfetmeye çalışmasına “Pekiştirmeli Öğrenme” denir. Bu modelde sisteme, örnek bir küme girişi yapılmamaktadır. Makine bir eylem gerçekleştirdiğinde çevre bu eyleme göre tepki verir. Oluşan tepkiye bağlı olarak bir ödül verilirse makine bu eylemin en iyi olduğu sonucunu keşfeder; ceza verilmesi durumunda ise makine eylemin yanlış olduğu çıkarımında bulunmaktadır.

### **Derin Öğrenme (Deep Learning)**

Derin öğrenme, makine öğrenmenin özel bir sınıfıdır. 1960’lı yıllarda ortaya çıkan derin öğrenme, insan beyninin bilgiyi işleme adımlarından esinlenerek oluşturulmuş yapay sinir ağlarını kullanarak sisteme girilen veriler hakkında hiyerarşik özellikleri öğrenmeye dayalı bir yapıya sahiptir.

Bir verinin sahip olduğu temsiller veya birden fazla özellikler o veri için hiyerarşik yapıyı oluşturmaktadır. Bu temsillerin içinden bazı özellikler veriyi diğerlerinden daha iyi temsil etmektedir. Bu aşamada derin öğrenme, sahip olduğu çeşitli algoritmaları kullanarak veriyi en iyi temsil eden hiyerarşik özellik için çıkarımlarda bulunmaktadır (Song ve Lee, 2013, s. 466-467).

Derin öğrenme otomotiv, sağlık, finans dahil birçok sektörde kendine geniş bir alan bulmuştur. Günümüzde sürücüsüz araç kullanımı, kanser hücrelerinin teşhisi, görüntü iyileştirme gibi başarılı örnekleri mevcuttur.

Derin öğrenmenin üç türü bulunmaktadır:

### **Konvolüsyonel Sinir Ağları (CNN)**

Diğer adıyla evrişimli sinir ağları, çok katmanlı algılayıcıların özel bir türüdür. Hayvanların görüntü işleme prensibinden esinlenerek oluşturulmuş CNN; görsel tanıma, sınıflandırma, analiz, dil işleme alanlarında yaygın kullanıma sahiptir. İlk CNN ağı 1988 yılında Yann LeCun tarafından ortaya atılmış, sonrasında yapılan çalışmalar ile geliştirilerek bugünkü teknolojiye erişmiştir (LeCun, vd., 2002, s. 41-46).

### **Tekrarlayan Sinir Ağları (RNN)**

1980'li yıllarda ortaya çıkan tekrarlayan sinir ağları, özyinelemeli sinir ağları, birimler arasında kurulan ilişkilerin kendi içinde yönlendirilmiş bir döngü oluşturduğu yapay sinir ağı türüdür. Bu döngü sayesinde önceki bilgilere dayalı bir çıktı üretmektedir. Temelde metin, müzik, video gibi sıralı verileri dönüştürme düşüncesi yatmaktadır (Mikolov, vd., 2010, s. 1045). Bu model, görüntüdeki nesnelere tanıma, konuşma tanıma ve yazı tanıma başta olmak üzere birçok alanda başarılı örnekler vermiştir.

### **Transformers**

İlk defa 2017 yılında Vaswani ve arkadaşları tarafından tanımlanan transformers, klasik yöntemlerden farklı olarak bütün seriye aynı anda odaklanabilen mekanizmasını kullanır (Vaswani, vd., 2017, s. 2-4). Bu sayede verileri paralel olarak işleyebilmektedir. Özellikle doğal dil işleme alanında diğer modellerden daha fazla üstünlük sağlar.

### **Bilgisayarla Görüntü ve Video İşleme (Computer Vision)**

Bilgisayarların görüntüleri analiz etmesini, nesne tanıma, hareket izleme ve yüz tanımasını sağlayan YZ teknolojilerindedir. Görüntü ve video işleme; temelde görüntünün yakalanıp istenilen formata sayısallaştırılmasına, analiz edilmesine ve iyileştirilmesine dayanır. Özellikle araç otomasyonu, güvenlik sistemleri, robot uygulamaları, insansız hava araçları, tarım uygulamaları, sağlık alanında teşhis amaçlı sistemleri, tasarım ve imalat uygulamaları olarak yaygın biçimde karşımıza çıkmaktadır (Solak ve Altınışik, 2018, s. 57). Bu alanda CNN ve LSTM (Long Short-Term Memory) kombinasyonu, Generative Adversarial Networks (GANs), Recurrent Neural Networks (RNN), transformers başta olmak üzere çeşitli derin öğrenme ve makine öğrenim algoritmaları sıklıkla kullanılmaktadır.

### **Doğal Dil İşleme (Natural Language Processing, NLP)**

Doğal dil işleme, bilgisayar sistemlerinin insan dilini algılamasını, yorumlamasını ve veri girişi olmadan çıktılar üretebilmesini ifade etmektedir. Ön işlem olarak kelime normalizasyonu, gürültü azaltma ve nesne standardizasyonu adımlarını izler. Ardından algıladığı cümlelerin özne-nesne-yüklem ilişkisini tespit etmeye yönelik analiz yapar. Bunun dışında sözcüklerin frekans, sayı gibi bilgilerini tespit eder (Zhou, vd., 2020, s. 279). Bu teknoloji sayesinde çeviri, metin analizi, sohbet

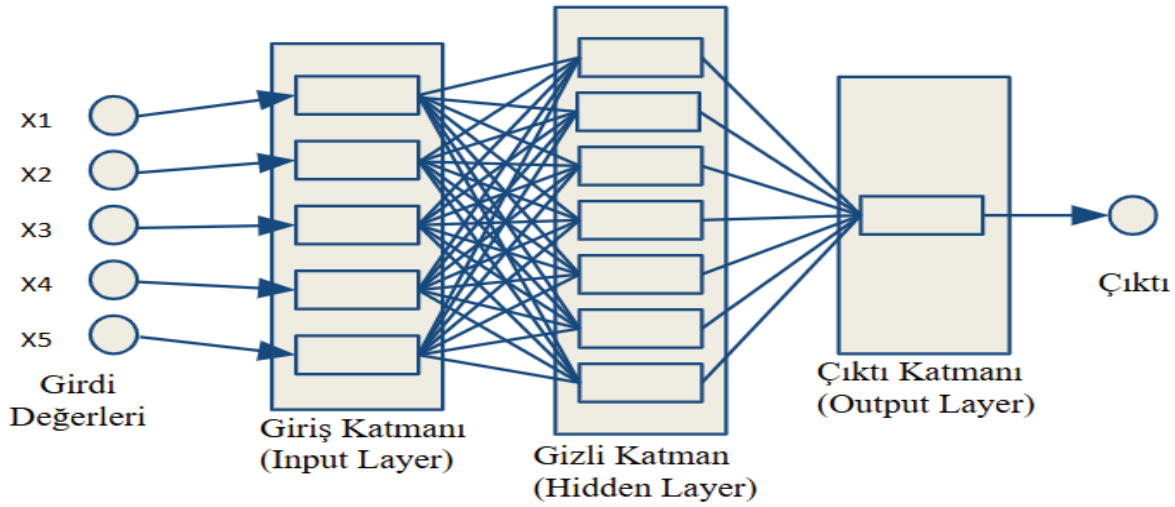
botları ve sanal asistanlar yaygın olarak kullanılabilir. RNN, LSTM, CNN gibi derin öğrenme algoritmalarıyla bütünleşik olarak günümüzde birçok probleme çözümler sunmaktadır.

### Sembolik-Mantığa Dayalı Yapay Zeka

Sembolik YZ, insanların düşünme sistemini ve mantık yürütme mekanizmasını modelleme amacı güden bir YZ biçimidir. Yukarıdan aşağıya doğru çalışma prensibine sahip olan bu yaklaşım gereği bir makinede gerçek evrendeki varlıklar, nesnelere veya kavramlar işaretler (semboller) ile temsil edilir. Daha sonrasında sisteme girilen karmaşık verileri mantık kuralları ve çıkarım yöntemlerini kullanarak yorumlaması ve buna yönelik aksiyon alması beklenmektedir (Wang, vd., 2019, s. 794-798).

### Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Networks, ANN)

YZ'nın bu modeli; doğadaki canlıların sinir sistemi işleyişini, karar verme ve öğrenme yapısını matematiksel olarak modelleyerek makinelerin insan gibi öğrenme ve karar verebilme yeteneği kazanmalarını sağlar (Alpaydın, 2011, s. 197). Yapay sinir ağları, girdi katmanından ağ yapısına giren bilgileri ara katmanda (gizli katman) işleyerek çıktı katmanına iletmektedir (Atalay ve Çelik, 2017, s. 162).



Şekil 1. Yapay Sinir Ağı Modeli

Başlangıçta ağın eğitilebilmesi için sisteme çeşitli örnekler gösterilmektedir. Bu, girdilere doğru ağırlık değerlerinin bulunmasıyla ilgilidir. Girilen örneklerin tamamı için doğru çıktılar üretildiğinde ağ, karar verebilecek hale gelir ve kazandığı bu yeteneklerle tüm başka girdilere doğru çıktı verebilmektedir (Öztemel, 2003, s. 31). Yapay sinir ağları bu prensiple birçok alanda başarılı sonuçlar vermiştir. Özellikle üretim planlama, ses tanıma, el yazısı tanıma, tıpta hastalıkların tespiti ve tedavisi, kalite kontrolü gibi pek çok örneği mevcuttur.

## Otonom Sistemler

Otonom sistemler, YZ algoritmalarıyla bir dizi parametreyi kullanarak fonksiyonları çözümlen, insan müdahalesine ihtiyaç olmadan istenilen görevleri yapabilen, diğer sistem bileşenleriyle iletişim kurabilen teknolojilerdir. İnsan faaliyetlerini ortadan kaldırmanın temel amaç olduğu otonom sistemler, başlarda insan hayatını tehdit eden koşullarda insanlar yerine kullanılmıştır. Günümüzde ise birçok alan için insan yerine “insan” gibi çalışan makineler üzerine yoğunlaşmaktadır.

Literatürde tam, yarı ve denetimli otonom olmak üzere üç ayrı sistem olarak ele alınmaktadır. Yarı otonom sistemler, elde ettikleri görüntülerle nesnelere seçebilir ve tanımlayabilir; ancak yakın mesafeden veya uydu bağlantısı ile dışarıdan insan müdahalesi ile kontrol edilir. Denetimli otonom sistemler, insan gözetiminde hedefi tanımlayabilen sistemlerdir. Tam otonom sistemler ise insan müdahalesi olmadan çevreye göre hedefi belirleyebilen, tanımlayabilen ve harekete geçebilen sistemlerdir (Atlıg, 2022, s. 6-7). Günümüzde pek çok yerde otonom (sürücüsüz) araçlar, otonom robotlar, dronelar ve insansız hava araçları bu sistemin başarılı örnekleri olarak karşımıza çıkmaktadır.

## Veri Madenciliği (Data Mining)

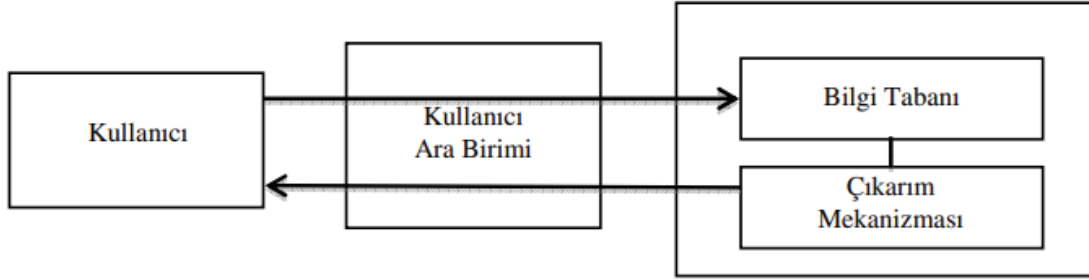
Büyük miktardaki veri setleri arasında saklı bulunan örüntü ve eğilimleri ayırıştırma olarak tanımlanan veri madenciliğinin ilk yazılım çalışmaları, 1992 yılında teknoloji geliştikçe artan veri setlerini kontrol ve analiz edebilmek amacıyla başlamıştır (Savaş, vd., 2012, s. 5).

Veri madenciliği işlemleri temelde altı aşamadan oluşmaktadır. Gürültü adı verilen hatalı verilerin veri setinden uzaklaştırılması işlemine veri temizleme aşaması denir ve bu ilk süreci temsil etmektedir. Ardından veri bütünleştirme işlemiyle farklı türdeki veriler tek türe dönüştürülür. Bundan sonrası için eğer en nihayetinde elde edilecek sonucun değişmeyeceği düşünülüyorsa veri miktarı azaltılarak veri indirgeme aşaması uygulanabilir. Veriler, kullanılacak modele en uygun şekilde dönüştürülerek veri madenciliği algoritmalarıyla sonuç elde edilir ve çıkan sonuç analiz edilir. Bu şekilde veri madenciliği sadece verileri analiz etmekle kalmaz, aynı zamanda karar verme süreçlerinde karar vericiye daha doğru bilgi sağlanmasıyla öne çıkmaktadır. Günümüzde pazarlama, borsa, finans, perakendecilik, sağlık, bankacılık, endüstri, bilim, istihbarat, genetik vb. birçok alanda başarılı uygulamaları görülmektedir (Akgöbek ve Çakır, 2009, s. 801-803).

## Uzman Sistemler (Expert System)

Literatürde pek çok tanımlaması yapılan uzman sistemler, derin bilgi birikimi gereken özel alanlı problemleri uzman bilgisi ile değerlendirip çözebilen bilgisayar programı olarak ifade edilebilir (Jackson, 1986, s. 2-11). Uzman kişilerin bilgileri ve edindikleri tecrübeleri bilgisayar ortamına aktarılarak bu verilerin bilgisayarın bilgi tabanında saklanmasıyla sürece başlanmış olunur. Saklanan parçalı veriler birleştirilip işlenerek uzmanlık seviyesi artırılır ve uzmanlık gerektiren problemlerle karşılaşıldığında bir uzman gibi izlediği yol haritasını nedenleriyle açıklayarak çözümler üretilir (Waterman, 1986). Böylelikle tutarlı ve daha hızlı çıktı almaya yardımcı olmaktadır.

1970'li yıllarda tıpta hastalıklara tanı koyma sorunlarına destek olabilmek amacıyla geliştirilmiş uzman sistemler, günümüzde tıpta tanı ve tedavi başta olmak üzere birçok alanda karar verme süreçlerini iyileştirmiştir. Kütüphanecilik alanında arşiv kontrolünde, endüstride iş süreçleri, sistem kontrol ve planlamasında, maden ve petrol yataklarının keşfinde, finans ve sigorta sektöründe gelişmeye açık başarılı örnekler vermiştir. MYCIN, PROSPECTOR, DENDRAL bunlardan sadece birkaçıdır (Yapıcıoğlu, 1991, s. 74-77).



Şekil 2. Uzman Sistemlerin Genel Yapısı (İçen ve Günay, 2014, s. 40)

### İçerik Önerisi

Bir başka YZ teknolojilerinden birisi de çeşitli alanlar için kullanıcıya içerik önerisinde bulunmaktır. Temel YZ öğrenme tekniklerinden farklı olarak girdiler için kullanıcıların geçmişte yaptığı seçimler kullanılır. Bu tercihler ile ortalama kullanıcıları temsil eden yeni ama sahte profil taslakları oluşturulur. Sonrasında herhangi bir kullanıcı için o kullanıcı profiline benzeyen, sistemde bulunan sahte kullanıcıların seçimlerine göre sıralanmış bir ürün serisi önerilir (Pan, 2016, s. 410-412). Ayrıca ürün serisi için kişiselleştirme imkanı da sunmaktadır. Sahte profil taslakları oluştururken sadece esas kullanıcı geçmişini baz alarak kullanıcının ilgi alanlarına hitap eden içerikler sunulur. Böylelikle kullanıcılara, daha çok içerik, daha kısa zamanda ulaştırılarak daha fazla bağımlılık yaratılmak istenmektedir. Bu durum medya ve iletişim sektöründe, pazarlama ve reklamcılık alanında müşteri talebini artırmak adına YZ teknolojilerinin kullanımını artırmıştır.

## ENDÜSTRİ 4.0 TEMEL TEKNOLOJİLERİ

### Büyük Veri (Big Data)

Endüstri 4.0'ın temel yapı taşlarından biri olan büyük veri, internet ortamında farklı birçok kaynaktan toplanan tüm verilerin oluşturduğu karmaşık veri kümeleridir. Bu veri kümeleri geleneksel yöntemlerle işlenemeyecek kadar büyük hacimli ve çeşitlidir. Çeşitli tekniklerle toplanan verileri aynı anda bütüncül olarak analiz edebilmeyi sağlayan büyük veri, beş ana bileşenden oluşmaktadır (Tonga ve Tonga, 2022, s. 48-49).

Hacim (Volume): Petabyte'tan daha büyük boyutlara ulaşabilmeyi temsil eden hacim, büyük verinin kapasitesini temsil etmektedir. Büyük boyutlardaki bu veri kümeleriyle işlem yapabilmek yeni yöntemlerin geliştirilmesi gerekliliğini meydana getirmiştir.

**Hız (Velocity):** İnternet ağı vasıtasıyla verilerin toplanması çok sayıda verinin kısa sürede üretilmesini sağlamıştır. Birim zamandaki bu devamlı artış yeni teknolojilerin gelişmesini hızlandırmıştır.

**Çeşitlilik (Variety):** Büyük boyutlu veriler, çeşitli kullanıcıların çeşitli kaynaklarda çeşitli türlerde bıraktığı izlerdir. Bu yönüyle büyük veride çeşitlilik (variety) bileşeni oluşmaktadır.

**Doğrulama (Verification):** Farklı birçok alandan gelen verilerin doğruluğu, sonucu yanıltmamak adına önemlidir. Bu noktada eldeki kümelerin güvenilirliğinin tespit edilmesi büyük önem taşımaktadır.

**Değer (Value):** Bu bileşen anlamlı verinin, çok sayıda veri kümelerinin oluşturduğu karmaşadan ayıklanarak elde edilmesini ifade etmektedir.

Tüm bu özellikleriyle büyük veri, birçok sektörde müşteri memnuniyetini artırmak amacıyla bireysel hizmet sağlamak için kullanılmaya başlanmıştır. Eğitimde öğrenme süreçlerini öğrenciye yönelik revize etmek, finans sektöründe müşterilere yönelik kişisel banka hizmetleri sunmak, imalat sektöründe toplanan tüm verilerden üretimin tüm aşamalarında oluşabilecek sorunları tespit edebilmek konularında sıklıkla karşımıza çıkmaktadır. Ancak bu durum verileri kullanırken kullanıcılara ait kişisel verilerin güvenle saklanamayıp sızdırılma ihtimalini ortaya çıkarır. Bu noktada toplanan verilerin güvenliğini sağlamak büyük veri teknolojisinin en önemli konularından birini oluşturmaktadır (Özcan, 2021, s. 18-19).

### **Nesnelerin İnterneti (IoT - Internet of Things)**

Nesnelerin interneti terimi, ilk kez 1999 yılında Kevin Ashton tarafından İngiltere'nin öncü teknoloji şirketlerinden birinde yaptığı sunum sırasında kullanılmıştır. Bu terim, fiziksel nesnelerin yani akıllı cihazların internet bağlantısı üzerinden birbirleriyle iletişim kurarak haberleşme ağı oluşturması olarak tanımlanmaktadır (Alçın, 2016, s. 25). Çeşitli çevresel verileri ölçen sensörler, fiziksel hareket etmeyi sağlayan aktüatörler veya diğer fiziksel cihazlar; çevrelerinden topladıkları verileri kablolu veya kablosuz bağlantılar üzerinden başka bir sunucuya veya bulut sistemine iletir. İletilen veriler, veri merkezinde işlenir ve analiz sonuçlarına göre geri bildirim verilir. Geri bildirimler; kullanıcıya bilgi vermek, fiziksel cihazda otomatik tepki oluşturmak veya bir süreç başlatmak gibi kolaylıklar sağlamaktadır.

Üretim ve tedarik süreçlerini çok daha pratikleştirerek insan gücüne olan ihtiyacı azaltan, maliyetleri düşüren, müşteri memnuniyetini artıran nesnelerin interneti teknolojisi; günümüzde metro istasyonları, akıllı otobüs durakları, akıllı aydınlatmalar, dumanı algılayabilen yangın sistemleri, akıllı saat, akıllı yüzük gibi giyilebilir teknolojiler başta olmak üzere pek çok şekilde karşımıza çıkmaktadır.

## **Bulut Bilişim (Cloud Computing)**

Literatürde birçok tanımı bulunan bulut bilişim, çeşitli veri türlerinin fiziksel cihazlar olmadan internet ağı aracılığıyla sanal bulut merkezlerinde saklanabilmesini ve kullanıcıların istenilen zamanda ulaşabilmesini sağlayan bir teknoloji şeklidir (Çark, 2019, s. 83). Artan teknolojik gelişmeler ışığında yazılım ve donanım sistemlerindeki kullanıcı sayısının hızla artış göstermesi, internet ortamında bırakılan veri miktarını da hızla artırmaktadır. Bu büyük veri setlerinin kaybolmadan depolanmak istenmesine çözüm olarak 2006 yılında Amazon şirketinin “Amazon S3” adını verdiği ilk bulut teknolojisi hizmete sunulmuştur (Bulut, 2018). 2008 yılı ve sonrasında daha fazla gelişim göstererek günümüzde herkesin kullanabileceği bir hale gelmiştir. Bu şekliyle bulut bilişim hizmeti sunan Google Drive, Amazon, Yandex Disk, Microsoft OneDrive gibi platformlar istenilen yerde, istenilen cihazlar ile istenilen zamanda erişim imkanı vermesi sebebiyle hem işletmeler hem de kullanıcılar için yüksek yatırımların getirdiği maliyetleri ortadan kaldırmaktadır (Tonga ve Tonga, 2022, s. 51).

## **Siber Güvenlik**

Tarihsel akış içerisinde artan dijitalleşme, internetin de hayatımıza girmesiyle aynı anda birden fazla sistemin birbiri ile bağlantı kurmasını ve haberleşmesini sağlamıştır. Bu, tüm sektörler için birçok kolaylığı sunarken sunuculara ait verilerin çalınması, habersiz kullanılması veya paylaşılması gibi büyük sorunları da beraberinde getirmektedir. Sadece kişiye ait bilgiler değil, işletmelerin üretim ve organizasyon süreçlerine ait veriler de risk altındadır. Özellikle Endüstri 4.0 ile akıllı fabrika yönetiminin artması, verileri saldırılara açık hale getirmiş ve bununla birlikte gerekli siber güvenlik önlemlerinin alınmasını zorunlu kılmıştır. Bu konuda yaşanmış en büyük olaylardan biri olan 2010 yılında nükleer çalışmalara engel olmak için ABD ve İsrail’in, İran’ın nükleer tesislerine düzenlediği “Stuxnet” siber saldırısı, çevreye kapalı sistemlerin bile hedef olabileceğini açıkça göstermektedir (Ozawa, vd., 2020, 85-89)

## **3D Yazıcılar ve Katmanlı Üretim (Additive Manufacturing)**

3D yazıcılar; bilgisayar destekli tasarım imkanı sunan CAD yazılımları üzerinde oluşturulmuş 3 boyutlu çizimlerin plastik, seramik, alçı, metal gibi katı; reçine gibi sıvı ve polipropilen gibi toz malzemeler ile gerçekte maddesel bir forma dönüştürülmesini sağlayan cihazlardır. Bu yöntemle insan gücü kullanmadan çizimin aynısı örnekler, kullanılan hammaddenin tabandan tavana doğru katman katman püskürtülmesiyle elde edilebilir (Kılıç, Ekici, 2012, s. 25-26). 3D yazıcılar ile katmanlı üretim; çizilen tasarım için örnek bir üretimi, özel parçalar için küçük seri üretimleri ve ihtiyaç halinde yedek parça üretimini sağlamaktadır. FDM (Fused Deposition Modelling), SLS (Selective Laser Sintering), Polyjet, Multi jet fusion (MJF), SLA (Stereolithography) gibi çalışma tekniklerine sahip 3D yazıcılar; geleneksel üretimden farklı olarak verimliliği artırması sebebiyle inşaat, otomotiv, sağlık sektörü başta olmak üzere birçok sektörde kullanılmaktadır.

## Akıllı Fabrikalar

Zaman içerisinde artan ihtiyaçlar ve gereksinimler talep eğrilerinde sürekli değişimlere sebep olmaktadır. Bu değişimlere en kısa şekilde uyum sağlamak, piyasalarda rekabet edebilmek adına en önemli sorunlardan birisidir ve görüldüğü üzere artık bu sorunun çözümünde geleneksel yollarla üretim yetersiz kalmaktadır. Artık pek çok yönetici, gelişen teknoloji ile fabrikasyon süreçlerini entegre etmeyi tüm firmalar için atılması gereken bir adım olarak görmektedir (Bulut ve Akçacı, 2017, s. 56).

Tüm endüstriyel üretim süreçlerini birbiri ile bağlantılı otonom robotlar ile devam ettirerek sadece dijital bir ağ bağlantısı ile toplanan veriler üzerinden koordine ve kontrol edebilmeyi sağlayan yapıya akıllı fabrika denmektedir. Endüstri 4.0'ın merkezinde yer alan akıllı fabrikalar, geleneksel üretim yöntemlerine göre kaliteli, verimli ve maliyeti düşük ürünleri çok daha hızlı bir şekilde üretebilmeyi sağlamaktadır. Bu sistemle insan gücüne olan ihtiyacı minimum seviyelere indirilebilir ancak tamamen sıfırlanmaz. Çünkü üretimi yapan robotların da bir uzman kişi tarafından dijital ortamda kontrol edilmesi gerekmektedir (Kabaklarlı, 2016, s. 11).

## Siber-Fiziksel Sistemler (CPS-Cyber-Physical Systems)

Siber-fiziksel sistemler; dijital ağ üzerinden birbirleriyle haberleşen sistem bileşenlerine, sensörler vasıtasıyla bilgisayarda ve sanal ortamda ulaşabilmeyi sağlayan sistemlerdir (Özsoylu, 2017, s. 52). Sistem bileşenlerinden gelen verilerin toplandığı ve çeşitli yazılım algoritmalarının oluşturduğu katmana siber; verileri toplamak için kullanılan donanım yapılarına ve çevre birimlerine fiziksel katman denmektedir. İlk kez ABD'nde tanımlanan siber-fiziksel sistemler, gerçek üretim ortamının ağ üzerinde simülasyonuna ulaşabilmeyi sağlamaktadır. Bu sayede bir problem veya aksaklık yaşandığında bilgisayar üzerinden takip ve müdahale edilebilmektedir (Erdoğan, 2022).

## Otonom Robotlar

Bilgisayar yazılımları üzerinden programlanarak dış çevrenin ısı, ışık, nem, hız gibi fiziksel koşullarını algılayabilen ve başka bir müdahaleye gerek duymadan topladığı verileri işleyerek girilen görevleri yerine getirebilen aygıtlara otonom robotlar denmektedir. İlk olarak 1980'li yıllarda insanlar için ağır sayılan yükleri ve uzak mesafelerde taşıma işlemi amacıyla kullanılmaya başlayan otomatik yönlendirmeli robotlar, otonom robotların ilk örneği olarak kabul edilmektedir. Ancak o zamanlar robotların ilerleyebilmesi için izleyeceği rota boyunca zemine kablolar, çizgiler veya raylar döşenmek zorunda kalınmıştır. Daha sonrasında Endüstri 4.0'la birlikte sensör teknolojisi YZ teknolojileri ile birleşerek robotları haritalama işlemiyle entegre etmiştir. Önceden belirlenen sabit bir güzergaha bağımlı olmamak, anlık en verimli yol planlaması yapmak adına büyük bir avantaj sunmaktadır (Tonga ve Tonga, 2022, s. 54-55). Robotların herhangi bir durum için karar alma sürecinde objektif değerlendirmeler yapması yanlış bir durumla karşılaşma ihtimalini düşürmektedir. Bu açıdan arıza ve fire oranı, insan gücüyle üretime göre çok daha azalmaktadır. Riskli çalışma ortamları için can kaybı riski barındırmaması, esnek üretime elverişli ve hızlı, kalitesi yüksek ürünler üretilebilmesi sağladığı diğer avantajlardan yalnızca birkaçıdır.



### **Artırılmış ve Sanal Gerçeklik (AR-VR)**

Çeşitli bilgisayar yazılımları ve donanımları kullanılarak gerçekte var olabilecek hayali mekanların 3 boyutlu olarak sanal ortama taşınması sanal gerçeklik olarak adlandırılmaktadır. Artırılmış gerçeklik ise gerçek ortamların olduğu gibi sanal ortama aktarılması ile sanal nesnelere birleştirilmesi olarak tanımlanmaktadır (Blossey, 2003, s. 302). Bu iki teknoloji sayesinde yeni tasarlanmış bir ürünün üretimi sonucunda yaşanabilecek durumların tespit edilmesi için çeşitli testler uygulanabilir ve böylelikle zamanda ve maliyetlerde azalma sağlanmış olur (Özen, 2019, s. 107).

### **Dijital İkiz ve Simülasyon (Digital Twin)**

Gerçek dünyadaki fiziksel bir nesnenin, bilgisayar yazılımları kullanılarak dijital ortamda oluşturulan birebir sanal ikizine dijital ikiz denmektedir. Tarihsel süreç içerisinde gelişimi incelendiğinde ilk örneği 1970’li yıllarda karşımıza çıkmaktadır. NASA (National Aeronautics and Space Administration)’nın “Apollo” adını verdiği uzay aracı fırlatıldıktan sonra ciddi bir hasar almış ve astronotların hayatı tehlikeye girmiştir. Dünyaya güvenli iniş için uzay aracının benzeri simülatörler kullanılmıştır (Allen, 2021, s. 4-7). Bu simülatörler dijital ikiz teknolojisinin temeli olarak sayılabilir ancak terimsel olarak ilk kez 2000’li yılların başlarında Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (PLM-Product Lifecycle Management) merkezinin oluşturulması için Michael Grieves’in yaptığı sunumda bahsedilmiştir (Grieves, 2014, s. 1-7).

Dijital ikiz teknolojisi, bir nesne veya sistem fiziki olarak ortada yokken sanal ortamda optimize edebilmeyi ve hataları tespit edip ortadan kaldırarak en verimli hale getirebilmeyi sağlamaktadır. Böylelikle üreticilere büyük maliyet avantajı getirmektedir. Ayrıca riskli fiziki sistem üzerinde çalışan personel için çalışmaya başlamadan önce fiziki sistemin birebir aynısını simüle ederek eğitimler verebilme imkanı sunmaktadır. Sadece var olmayı değil kurulu bir ürün, hizmet veya sistemin birebir sanal hali üzerinden izleyerek verileri analiz edebilmeyi ve gerekli durumlar için kontrol edebilmek de ayrıca mümkündür (Wu, vd., 2020, s. 4094).

### **Yatay ve Dikey Sistem Entegrasyonu**

Yatay entegrasyon, bir şirketin kendi süreçleri arasında veya hitap ettiği müşteri kitlesi aynı olan farklı şirketlerin entegre olması olarak ifade edilmektedir. Dikey entegrasyon ise şirket içindeki farklı süreçlerin birbiri ile veya aynı sektör içinde bulunan, farklı alt sektörlerde de müşteri kitlesi bulunan şirketlerin entegre olmasıdır (Özsoylu, 2017, s. 60). En basit anlatımla, bir sistemin kendi yatay düzleminde veya dikey anlamda üst ve alt düzlemler ile kurduğu ilişki olarak da tanımlanabilir.

Piyasaya sürülen bir ürünün çok kısa sürede popüleritesini yitirmesi ve o piyasa için rekabet ortamının hareketliliği sebebiyle şirketler tarafından yatay entegrasyon sistemleri tercih edilmektedir. Temel amaç, piyasada belirsizliği azaltarak pazar payını artırmaktır. Bu yönüyle en çok piyasaya yeni girmiş şirketler tarafından tercih edilmektedir (Garbie, 2016, s. 82).

Dikey entegrasyon ise; girdi kaynaklarına yönelik, çıktıyı kullanıcıya yakınlaştırmaya yönelik veya her iki üst ve alt düzeye yönelik dengeli şekilde olmak üzere üç türde birleşmeyi ifade etmektedir.

Bu iki bileşen; bir değişiklik meydana geldiğinde hızlı cevap oluşturmak, hitap edilen kitleye özel üretimi kolaylaştırmak gibi daha esnek bir üretim yapısı sunmaktadır.

### **YAPAY ZEKA VE ENDÜSTRİ 4.0 BİRLEŞİMİ, FAYDALARI VE ZORLUKLARI**

Endüstri 4.0 devrimiyle, makinelerin insan kontrolü altında üretimde yardımcı olarak kullanıldığı dönemlerden, tamamen makine ve robot kontrolüne bırakılan dönemlere gelinilmiştir. Başta sadece üretimde fiziksel olarak iş yüklenen makineler, YZ ve çeşitli bileşenlerinin entegrasyonu ile tam bir çalışan gibi zihinsel olarak da üretimde yer almaya başlamıştır. Günümüzde ise, üretimde operasyonel süreçlerden stratejik yönetim süreçlerinde karar alma sistemlerine kadar neredeyse işletmelerin tüm faaliyetlerinde bu birleşimin örneklerini görmekteyiz.

Tüm üretim süreçlerinde dijitalleşmeyi amaçlayarak akıllı fabrika yapısının kurulmasını ifade eden Endüstri 4.0 bileşeni, sistemlerin akıllı hale getirilmesi aşamasında YZ ile birleşmektedir. Sadece üretim yapabilen değil dış çevreyi algılayabilen, deneyimleyerek öğrenen ve geçmiş tecrübelerden yola çıkarak karar alan birbiriyle uyumlu sistemler oluşturulmak istenmektedir. İnsan zekasının benzeri bir sinir ağı rol model alınarak geliştirilmiş YZ teknolojileri tam bu noktada karşımıza çıkmaktadır. Bu birleşim ile daha esnek, daha verimli ve sistematik bir fabrikasyon modeli kaçınılmazdır.

YZ ile donatılmış robot teknolojileri, akıllı fabrikanın en temel ögesidir. Sistemlerde tam otomasyon tercihi, insan gücüne olan ihtiyacı azaltırken iş gücünde de bir dönüşüm meydana getirir. İnsanları riskli ve tekrarlayan işlerden kurtararak değerli ve yüksek beceri gerektiren görev tanımlarına kapı aralar. Ancak sağladığı en büyük fayda bu değildir. Üretim sahasına yerleştirilen sensörler aracılığıyla tüm süreçlere dair verilerin toplanması sağlanmaktadır. YZ ile bu veriler işlenerek gerçek zamanlı veri analizi yapılır ve üretimin her aşaması takip edilir. Böylelikle yaşanan aksaklıklar veya hatalar tespit edilerek, iyileştirmelerle optimize edilir. Bu çalışmaların bir düzen halinde yapılmasıyla, kıt kaynakları daha az kullanarak üretimde ve dolayısıyla verimlilikte artış sağlanmaktadır.

Sensörler ile sadece süreçleri değil aynı zamanda sistem bileşenlerini de izlemek mümkündür. Bir makine için bütünde veya özelde yaşanabilecek arızalar düzenli takip ile önceden tahmin edilebilir. Proaktif bakım yaklaşımı benimsenerek kesinti yaşanmadan üretim yapılabilir.

Artan rekabet ortamında tutunabilmek ve hatta lider olabilmek için pazardaki değişimlere kısa sürede adapte olmak önemlidir. Bu noktada YZ ve Endüstri 4.0 birleşiminin bir diğer faydası ise değişen tüketici ihtiyaçlarını tespit ederek trendlere göre özelleştirilmiş üretim çıktıları verebilmektir. Böylelikle daha esnek üretim hatlarına sahip olunabilir.

Endüstri 4.0 ve YZ teknolojilerinin sistemlere entegrasyonu, başlangıç için yüksek yatırım maliyetlerini de beraberinde getirmektedir. Üretim alanının yenilenmesi, yazılım ve donanımların kurulumu ve çalışan personele eğitimlerin verilmesi önemli bir maliyet unsurudur. Dolayısıyla özellikle küçük veya orta ölçekli firmalar için geçiş süreçlerini zorlaştırmaktadır.

Geçiş kararını almak zor olduğu gibi hayata geçirmek için atılan adımlar da çeşitli zorlukları içerisinde barındırır. Saha içinde bulunan tüm bileşenleri uyum içinde çalıştırabilmek için kusursuz bir entegrasyon gerekir. Kimi bileşen uyumsuzluk yaratırken, teknolojinin karmaşıklığı da yazılım aşamasında hata yapmaya meydan verebilmektedir. Bu süre içinde yaşanabilecek çeşitli aksaklıklardan ötürü üretim olumsuz etkilenebilir.

Endüstri 4.0 ve YZ teknolojileri nitelikli işgücü ihtiyacını artırmaktadır. Yeni teknolojileri doğru kullanabilmek adına yazılım ve donanımsal bilgi sahibi vasıflı çalışanlara ihtiyaç vardır. Bu nedenle, sisteme çalışanları da dahil edebilmek adına sürekli eğitim ile beceri geliştirmek gerekmektedir. Basit ve belli bir sistematığı olan işler için otomasyonun tercih edilmesi bazı kariyer alanlarını kapatırken işveren beklentilerinin arttığı yeni tanımlamalar da ortaya çıkarmaktadır.

Daha önemli bir başka sorun ise veri güvenliğini sağlayabilmek konusunda karşımıza çıkar. İşletmeyi oluşturan tüm bileşenlerden üretim planlamaları, satış rakamları, muhasebe raporları başta olmak üzere her an yeni veriler üretilmektedir. Büyük boyutlu bu verileri depolayabilmek adına ağ tabanlı bulut bilişim sistemleri kullanılmaktadır. Tam bu noktada verilebilecek herhangi bir güvenlik zafiyeti büyük finansal kayıplara sebep olabilir. Bu nedenle her şirketin siber saldırılara karşı kendi güvenlik önlemlerini alması ve riskleri ortadan kaldırması büyük öneme sahiptir.

YZ teknolojilerinin sağladığı en büyük katkı şüphesiz öğrendiklerinden yola çıkarak kendi başına karar alabilmesidir. Ancak bazı açıdan çeşitli tartışmalar doğmaktadır. Özellikle, insan kaynakları yönetimi konusunda karar verici olarak kullanılmaya başlanması şeffaflık ve etik olma sorunları yaratabilir. Çünkü bu süreçler sadece mantıksal boyutta değil duygusal anlamda da değerlendirilmektedir. YZ ile bütünleşmiş bir sistem duyguları ayırt etmekte ne derece başarılı olabileceği halen belirsizliğini korumaktadır. Ayrıca çalışan haklarını etkileyen konularda alınan kararların hukuki açıdan ne boyutta düzenlemeye tabi tutulması gerektiği de önemli bir mesele olarak görülmektedir.

## **YAPAY ZEKA VE ENDÜSTRİ 4.0 UYGULAMA ALANLARI**

YZ ve Endüstri 4.0 birleşiminin örneklerini eğitim, turizm, sağlık, üretim başta olmak üzere birçok sektörde ve bu sektörler içinde birçok alanda karşımıza çıkmaktadır. Bu bölümde çeşitli sektör ve alanlardaki uygulamalar ele alınmıştır.

### **Sağlık**

Sağlık sektörü, endüstriyel alanlardaki dönüşümleri uygulamak konusunda tarih boyunca diğer sektörlerin gerisinde kalmıştır. Şüphesiz bunun sebebi olarak zamanla yeni sağlık sorunlarının doğması ve eğitim seviyesindeki artış ile sağlık alanında okuryazarlık oranının paralel olarak artması gösterilebilir.

Sağlık sektöründe dijitalleşme sürecinin başlangıcı randevu alma, muayene, tedavi olma, sonuçların raporlanması gibi sağlık hizmetlerinin internet ortamına taşınması ve hastalara ait verilerin bir bulut

sistemi üzerinde toplanması olarak ifade edilebilir. Bu sayede YZ araçları ve uzman sistemler yardımıyla hastalara ait tetkik sonuçları daha hızlı incelenerek tanı konulabilmektedir. Özellikle resim ve görüntü algılama ve analiz edebilmeyi sağlayan teknolojilerle hastalara ait radyoloji görüntüleri kıyaslanarak kanser veya kronik hastalıkların erken teşhisi sağlanmaktadır. Teşhis sonrası süreçte ise hastaya takılan sensörler aracılığıyla işlenmemiş veriler, nesnelere interneti tabanlı uzaktan takip sistemiyle elde edilir ve makine öğrenmesi ile çeşitli algoritmalarla işlenerek hastanın anlık durumu ve gelecekte oluşabilecek bir risk ile ilgili uyarıda bulunulur. Ancak bununla sınırlı değildir. Son zamanlarda yaşanan birçok gelişme, tıp alanında da işleri kolaylaştırmayı başarmıştır. Bunların başında insan biyolojik yapısı ve hastanelerin dijital ikizinin oluşturulmasıdır. Hastanelerin dijital ikizlerini oluşturmaktaki amaç, hastanın hastaneye girmesinden sağlıklı bir şekilde çıkana kadarki tüm sağlık hizmetlerini iyileştirebilmektir. Bunun için ameliyathanelerden acil servislere, danışmanlık biriminden başhekim yönetim sistemine kadar tüm veriler bilgisayar ortamına aktarılarak gerçek bir kopya oluşturulur. Böylelikle planlama, performans takibi veya bakteri yayılma oranları gibi birçok açıdan risk analizleri ve takibi yapılabilmektedir (Hempel, 2017).

Hastaların dijital ikizi ise insan biyolojik yapısının simüle edilmesini ifade etmektedir. Ancak şimdiye kadar tüm bedenden ziyade organ gibi bölgesel yapıların simüle edilmesinde başarılı olunmuştur. 2014 yılında ABD’nde “Yaşayan Kalp” adı verilen bir projeye ilk kez bir organ tüm yapısıyla modellenmiştir (Dassault Systèmes, 2017). Organ yapılarının karmaşık ve detaylı oluşu bu alanda gelişmeyi kısıtlamaktadır. Bu nedenle hastanın dijital ikizi, en çok ilaç üretiminde yeni ilaçların insan bedenine etkisi araştırılırken kullanılmaktadır. Her ne kadar insan sağlığını korumak temel amaç edinilmiş olsa da bu gelişmelerle hayvanlar üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinde de azalış yaşanmıştır.

Daha yakın zamanlarda konuşmaya başladığımız gelişmelerden biri de tıbbi müdahale sırasında ve tedavide YZ destekli robotik sistemlerden yardım alınmasıdır. Kimi hastalıkların teşhisi için dar ve küçük yapılı damar, organ veya vücuttaki bir bölgenin görüntülenmesi gerektiğinde veya tedavi için yine o bölgelere müdahale gerektiğinde mikro-nano robotlar sıklıkla kullanılmaktadır. Bu sayede kanserli hücrelerin tedavisi, damar tıkanıklıklarının tespiti gibi işlemler kolaylıkla gerçekleştirilmektedir. Robotlar, tedavilerde yardımcı araç olmak dışında artık tedavinin tam kendisi olarak da kullanılmaktadır. Uzun kayıplarıyla sonuçlanan vakalarda, yapay sinir ağı modellemesiyle hastaya özel robotik uzuv tasarımı yapılmaktadır. Metalik görünümü dışında o uzuvdan hiçbir farkı olmayan yapay uzuvlar, işlevsel olarak da vücutla uyumlu çalışmaktadır.

Robotlarla ilgili günümüzde hala çalışmalar devam etmektedir. Son güncel gelişme ise 2022 yılında ABD’nde tasarlanan bir robotun domuz üzerinde yaptığı bağırsak ameliyatını hiçbir insan müdahalesi olmadan başarılı bir şekilde tamamlamasıdır.

Sağlık sektörü, sürekli iyileştirme süreci gerektiren önemli bir alandır. Çünkü her birey yüksek kalitede ve düşük maliyetle tüm sağlık hizmetlerine kolaylıkla ulaşma hakkına sahiptir.

## Eğitim

Sağlık sektöründe olduğu gibi Endüstri 4.0 devriminin eğitime etkileri geç yansımış olsa da özellikle Covid-19 pandemisiyle birlikte kısa sürede Eğitim 4.0 konuşulur hale gelmiştir.

Eğitim 4.0, ileri teknolojiler ile eğitimi dijitalleştiren, kişi ihtiyaçlarına göre özel öğrenme süreçleri getirerek yeni bir yaklaşım oluşturan bir sistemi temsil eder. Temel amaç öğrencinin gereksinimlerine göre bir eğitim modeli oluşturmaktır. Öğrenme süreçlerinde öğrencilere ait veriler toplanarak büyük veri bulut tabanında YZ algoritmalarıyla işlenir ve öğrenci için en verimli olacak şekilde bir eğitim modeli tasarlanır. Böylelikle birbirinden farklı her birey için daha faydalı bir yapı kurulmuş olur.

Endüstri 4.0'ın getirdiği en belirgin özellik olarak eğitim sisteminde de tüm eğitim süreçleri dijital ortam üzerinden yürütülmektedir. Bu, eğitimciler için daha kolay bir yönetim imkanı sunarken, öğrencilere ağ üzerinden mekan kısıtlaması olmaksızın her alandan bilgiye daha hızlı ulaşım fırsatı da vermektedir. Ayrıca çevrimiçi eğitim teknolojileriyle birlikte geleneksel eğitiminin araç ve gereçlerine ihtiyaç kalmayarak eğitimde de sürdürülebilir bir pencere açılmıştır.

## Tarım

YZ ve Endüstri 4.0 teknolojilerinin birleşmesiyle tarım alanında da Tarım 4.0 terimi yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu kavramla birlikte geleneksel yöntemler terk edilerek modern teknoloji ile daha kaliteli ve verimi yüksek ürünler üretilirken maliyetleri düşürmek hedeflenmektedir.

Akıllı tarımın sağladığı en büyük avantaj, çiftçilerin nesnelerin interneti teknolojisi ile uzaktan üretim arazilerini görebilmeleridir. Isı, ışık, nem seviyelerini, sulama ve ilaçlama sistemlerini orada bulunmadan kontrol edebilir ve süreçleri yönetebilirler. Yine IoT teknolojileri kullanılarak tarım araçları da birbirleri ile uyumlu bir şekilde etkileşimli olarak çalışabilmektedir.

Tarım yapabilmek için en önemli faktörlerden birisi toprağın yapısı ve arazinin coğrafi konumudur. Hava araçlarındaki sensörler sayesinde görüntü işleme teknolojisi kullanılarak tüm coğrafi koşullar analiz edilirken çiftçi için araziye göre raporlar oluşturulmaktadır. Bu durum tarım ürünlerinde verim tayini yapmayı sağlarken olası zararlı böcek veya hastalık senaryoları için de bilgi vermektedir. Tüm bu analizler için ayrıca dijital ikiz teknolojisinden de yararlanılmaktadır. Baştan sona üretime ait tüm veriler sensörler yardımıyla toplanarak ortamın birebir aynısı simüle edilmekte ve analizler yapmayı, sanal ortamdaki eş zamanlı olarak takip etmeyi sağlamaktadır.

Endüstri 4.0'ın temel yapı taşlarından biri olan otonom sistemler, büyük tarım arazileri için insan emeği ihtiyacını ciddi oranda azaltmaktadır. Sapları ve ürünleri ayıran biçerdöverlerden en uygun yere dikim yapan robotlara, zararlı otları tespit ederek hassas ilaçlama yapan sistemlerden toprak tipine göre tarlayı süren traktöre kadar birçok kolaylık sunulmaktadır. Çağımızda giderek azalan kıt kaynaklar ile daha sürdürülebilir bir tarım sistemi oluşturmak tüm bu dönüşümün esas amacıdır.

## Savunma Sanayi

Diğer sektörlere kıyasla teknolojik gelişmeler savunma sanayisinde dikkatle takip edilip hızla uygulanmaktadır. Bunun sebebi şüphesiz diğer devletler üzerinde güç üstünlüğü kurabilmek olarak gösterilebilir. Savunma sistemi sürekli geliştirilerek rakiplere karşı lider pozisyon hedeflenmektedir (Meydan, 2015, s. 15-16). Bu nedenle hem kendi sistem verilerini hem de rakip sistem verilerini elde ederek analiz ve yorum yapmak büyük öneme sahiptir.

Tüm askeri süreçler düşünüldüğünde yüksek boyutlarda büyük veriler elde edilmektedir. Geri dönüşü olmayan sorunlar yaşamamak adına ülke yönetimi için kritik öneme sahip bu verilerin siber saldırılara karşı güvenliğinin alınması elzemdir. Bu veriler, karmaşık durumları çözmeyi ve stratejik-taktik kararlar alabilmeyi sağlamaktadır. Ancak genele bakıldığında daha çok istihbarat alanında kullanılmaktadır. Yabancı kaynak veya kişilerin amaçları için gerçekleştirecekleri eylemlerin tespit edilmesi, düşman ülke veya grupların bir adım önüne geçebilmeyi sağlar.

Tüm sektörlerde olduğu gibi askeri alanda da otonom robotlar kolaylıkla yerini almıştır. YZ ile donatılmış robotik sistemler zorlu şartlarda gözlemleme, istihbarat, bomba imha, saldırı ve savunma gibi daha birçok görev için tercih edilmektedir. İnsansız hava araçları (İHA), dikey insansız hava araçları (DİHA), dronelar ve bomba imha robotları (BİR) sıklıkla kullanılan otonom sistemlerin başında gelmektedir.

Endüstri 4.0 ve YZ birleşimiyle geliştirilmiş teknolojileri sektörlere entegre ederken maliyet ve zaman kaybı olmaması açısından eş zamanlı olarak çalışanları da eğitmek gerekmektedir. Ancak askeriyede sürekli operasyon hali bulunmadığı için olası durumlarda askerleri hazırlamak adına savaş ortamının benzeri oluşturulması önemlidir. Artırılmış Gerçeklik ve simülasyon teknolojileri eğitimde çoğunlukla tercih edilen teknolojilerdendir. Operasyon sırasında çıkan sesleri duyabilmek, ekip üyeleri ile iletişim kurabilmek ve gerçek bir çatışma anını deneyimleyebilmek için çeşitli ekipmanlar giydirilir. Bu sayede askerler, baskı ve stres anında hayati kararlar alabilmeyi ve tehlikeli süreçleri yönetebilmeyi, gerçek bir çatışmaya girmeden önce tecrübe etmiş olmaktadır (Flores, 2013).

Askeri ekipman ve mühimmatları kullanabilmek kadar doğru bakımı yapmak da önemlidir. AR (Artırılmış Gerçeklik) gözlükleri ile bakım için gerekli eğitimler verilebilir ve kayıtları tutularak arıza durumunda değerlendirilmek için kullanılabilir. Bu eğitim içeriğinde simülasyon teknolojileri de büyük öneme sahiptir. Özellikle uçuş eğitimlerinde gerçek uçuşa çıkmadan önce simülasyonlar ile hava aracının birebir kopyası oluşturularak her türlü kaza ve risk tayin edilerek ölüm ve faciayla sonuçlanabilecek durumlar için önlem alınmış olunur.

## Gastronomi ve Turizm

Endüstri 4.0'ın hayatımıza girmesiyle birlikte turizm sektöründe turist hareketliliğini artırmak, maliyetleri düşürmek ve rekabet üstünlüğü yaratmak amacıyla Turizm 4.0 dönüşümü yaşanmıştır. Akıllı turizm; IoT, sanal gerçeklik, otonom sistemler, büyük veri, bulut bilişim ve YZ teknolojileri ile birlikte turizm sektörünün parçası olan tüm süreçlere inovasyon getirmektedir. Başlangıç

sürecinde farklı lokasyonlardan turist kazanımını artırmak adına rezervasyon işlemlerinin dijital ortamda yürütülmesi, sağlanan en büyük kolaylıklardandır. Diğer bir kolaylık ise Dünya'nın her noktasından turist gelebileceği düşünülerek tatil öncesinde bulunduğu lokasyona gitmeye gerek kalmadan, seçilen tatil merkezini sanal gerçeklik ile görüntüleyebilme hizmeti vermektir. Ayrıca tatil merkezlerine entegre edilen akıllı otel sistemleriyle kusursuz yönetim ağı oluşturularak turist memnuniyeti artırılmış olur.

Turizm sektörüne paralel olarak yiyecek ve içecek sektörleri de bu gelişimden nasibini almıştır. Menü içeriğinin telefon uygulamaları ile kontrol edilmesi, mutfak ve servis hizmetlerinde YZ tabanlı robotik sistemlerin kullanılması ve üç boyutlu yazıcılar ile yenilebilir yemekler hazırlanması başta olmak üzere birçok kolaylık Gastronomi 4.0 kapsamına girmektedir (Dankar, vd., 2018, s. 232-239).

Son zamanlarda büyük restoran ve kafelerde müşteri yoğunluğunu yönetebilmek için robot garsonlar kullanılmaya başlanmıştır. Böylelikle servisin hızlı bir şekilde yapılmasının yanında müşteri tercihleri de saptanarak menü üzerinde devamlı güncellemeler yapılabilmektedir. Müşteri tercihleri e-menü hizmetiyle de takip edilebilir. Bu teknoloji sayesinde yemek içeriği ve kullanılan malzemeler hakkında bilgi elde edilebilirken mutfakta yemek yapım aşaması canlı olarak izlenebilir. Bu iki sektör, müşteri memnuniyetine bağlı olarak varlığını sürdürmektedir. Bu nedenle süreç ne denli iyileştirilirse verimlilik, müşteri memnuniyeti ve kalite artarken: maliyetler ve hatalar da aynı zamanda azalmaktadır.

### **Tedarik Zinciri ve Lojistik Yönetimi**

Tedarik zinciri, hammaddenin işlenip tüketiciye ulaşacak hale gelene kadarki tüm süreçler için depolama, nakil, dağıtma ve kontrol aşamalarının yönetilmesi olarak tanımlanır. Bu kompleks yapının kusursuz yönetimi için Endüstri 4.0 ve YZ bileşenlerine ihtiyaç duyulmuştur.

Tedarik zincirinin ilk aşaması olarak stok kontrolü ve yönetiminin doğru yapılması üretimin aksamaması adına önemlidir. Bu konuda, ürünlerin üzerine yerleştirilmiş sensörlerden anlık veri akışı sağlanarak uzman sistemler, yapay sinir ağları, bulanık mantık gibi çeşitli YZ algoritmaları ile dijital ortamda envanter modelleri üzerine analizler yapılabilmektedir (Min, 2010, s. 15-27). Takip eden diğer süreçlerde en uygun ulaşım ağını tasarlarlarken, satın almaya yönelik doğru kararlar alırken ve talep tahminlemesi ve bağlı olarak planlaması yapılırken de YZ'nin çeşitli algoritmalarından yararlanılarak zaman ve para kaybı da azaltılmaktadır.

Tedarik zinciri yönetiminde yaşanan aksaklıklara paralel olarak lojistik faaliyetlerin yönetiminde de çeşitli sorunlar, teknolojik gelişmeler ışığında giderilmektedir. IoT, siber fiziksel sistemler, otonom sistemler, büyük veri ve radyo frekansı ile belirli mesafelerden otomatik tanımlamayı sağlayan RFID sistemlerin entegrasyonu ile lojistik yönetiminde de dijitalleşme adımları atılmıştır.

Hammadde, mamul ve yarı mamuller üzerine yerleştirilen sensörler ile otomatik bir sistem kurularak dijital ortamdaki daha hızlı, kolay ve güvenilir bir takip sistemi kurulmaktadır. Ayrıca kimi teslimatlar

için robot veya dronelerin tercih edilmesiyle daha sürdürülebilir bir yaklaşım sergilenmiş olur. Bu ve benzeri teknolojilerin kullanımını artırmakla nakliye maliyetlerinin azaltılabildiği görülmüştür.

## SONUÇ

YZ ve Endüstri 4.0, birbirini tamamlayan ve güçlendiren teknolojiler olarak günümüzde endüstriyel üretim süreçlerinin dönüşümünü hızlandırmaktadır. Endüstri 4.0'ın getirdiği otomasyon, veri analitiği ve akıllı sistemler, YZ'nın sunduğu algoritmalarla birleşerek üretim süreçlerinin optimize edilmesini sağlamaktadır. Akıllı fabrikalar, otonom robotlar, veri odaklı karar alma sistemleri ve tahmine dayalı bakım çözümleri gibi uygulamalar, bu iki teknolojinin nasıl birbirini desteklediğini ve endüstri üzerindeki etkilerini açıkça gözler önüne sermektedir.

YZ, Endüstri 4.0'ın temel bileşenleri olan IoT, siber-fiziksel sistemler ve büyük veriyi analiz etme ve yorumlama kapasitesine sahiptir. Bu sayede makineler ve sistemler, çevrelerinden topladıkları verilerle daha akıllı kararlar alabilir, üretim süreçlerini optimize edebilir ve insan müdahalesi olmadan kendi kendilerine çalışabilirler. Sonuç olarak, Endüstri 4.0, YZ'nın güçlü analiz yeteneklerini daha verimli bir şekilde kullanarak üretimi dönüştürürken, YZ da Endüstri 4.0'ın sunduğu verilerden yararlanarak daha doğru ve öngörülebilir sonuçlar üretebilmektedir.

Başlangıç için yüksek yatırım maliyetleri gerektirse de iş gücü ihtiyacını düşürmesi, hatayı ve fireyi azaltarak maliyetleri azaltması, süreçleri optimize etmesi, verimlilik ve kalitede artış ve zamandan tasarruf sağlaması sayesinde kısa süre içerisinde katlanılan maliyetler amorti edilebilmektedir.

YZ tabanlı akıllı fabrikasyon dönüşümüyle, üretim sistemleri için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını artmaktadır. Daha az enerji tüketimi ve hammadde ihtiyacı, çevreye salınan kirli gaz, sıvı veya katı bileşenlerin miktarını hatırı sayılır oranda azaltmaktadır. İş tanımları ve türlerinde yaşanan değişim ile mavi veya beyaz yakalı personel için farklı görevlere yerleşmesi, bazı açılardan sürdürülebilirlik alanında olumlu sonuçlar vermektedir.

Önemle üzerinde durulması gereken bir diğer konu ise güvenlik sorunudur. YZ ve Endüstri 4.0 teknolojileri işletmelerin tüm süreçleri için toplanan verileri bulut sistem üzerinde depolar. Her çalışan kendi bölümünün bilgilerine ağ üzerinden kolaylıkla ulaşabilmektedir. Ancak tam bu noktada yaşanabilecek siber saldırılara karşı bir önlem alınmamışsa işletme için bir son yaşanabilir. Buna mahal vermemek için tüm senaryolara karşı güvenlik önlemi alınmış olmalıdır.

İncelenen örnek sektörler üzerinde görüldüğü gibi bu dönüşüm, zaman içerisinde birçok gelişme yaşamış ve hemen hepsi için başarılı sonuçlar vermiştir. Her geçen gün artan yenilikler ışığında bundan sonraki zamanlar içinde de başarılı dönüşümler yaşanmaya devam edecektir.



**KAYNAKÇA**

- Acar, O. (2020). *Yapay zeka fırsat mı yoksa tehdit mi?* İstanbul: Kriter Yayınevi.
- Akgöbek, Ö. & Çakır, F. (2009). Veri madenciliğinde bir uzman sistem tasarımı. *Akademik Bilişim*, 9, 801-806.
- Alçın, S. (2016). Üretim için yeni bir izlek: Sanayi 4.0. *Journal of life Economics*, 3(2), 19-30.
- Allen, B. D. (2021). *Digital twins and living models at NASA*. Digital Twin Summit.
- Alpaydın, E. (2011), *Yapay Öğrenme*, İstanbul: Boğaziçi Üniversitesi Yayınevi.
- Atalay, M. & Çelik, E. (2017). Büyük veri analizinde yapay zekâ ve makine öğrenmesi uygulamaları. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 9(22), 155-172.
- Atlığ, M. (2022). Otonom Sistemlerin Savaş Ve Savaş Hukukuna Etkisi. *Akademik Düşünce Dergisi*(6), 3-21. <https://doi.org/10.53507/akademikdusunce.1170896>
- Aydın, N. (2018). *Endüstri 4.0 Dördüncü Sanayi Devrimi*, Ankara: İksad Publishing House Yayıncılık.
- Banger, G. (2018), *Endüstri 4.0 Uygulama ve Dönüşüm Rehberi*. Eskişehir: Dorlion Yayınları.
- Blossey, R. (2003), Self-cleaning surfaces—virtual realities. *Nature Materials*, 2 (5): 301–306.
- Bulut, C. *Bulut Bilişim (Cloud Computing) Nedir?*, Türkiye'nin Endüstri 4.0 Platformu, Erişim: 11.12.2024, <https://www.endustri40.com/bulut-bilisim-cloud-computing-nedir/>
- Bulut, E. & Akçacı, T. (2017). Endüstri 4.0 ve inovasyon göstergeleri kapsamında türkiye analizi. *ASSAM Uluslararası Hakemli Dergi*, 4(7), 55-77.
- Çark, Ö. (2019). *Kurumsal Kaynak Planlama (KKP) Sistemleri*. Ankara: Gazi Kitabevi.
- Dankar, I. Haddarah, A., Omar, F. E., Sepulcre, F., ve Pujolà, M. (2018). 3D printing technology: The new era for food customization and elaboration. *Trends in food science & technology*, 75, 231-242.
- Dassault Systèmes, (2017). The Living Heart Project A Translational Research Initiative to Revolutionize Cardiovascular Science Through Realistic Simulation. Erişim Tarihi: 31 Aralık 2024, <https://www.3ds.com/products-services/simulia/solutions/life-sciences-healthcare/the-living-heart-project/>
- Dombrowski, U. & Wagner, T. (2014). Mental strain as field of action in the 4th industrial revolution. *Procedia Cirp*, 17, 100-105. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.01.077>
- Erdoğan, F. (2022), Endüstri 4.0 Ve Yapay Zeka Uygulamalarının Güç Trafoları Üretim Montaj Çalışmalarında Fine Kinney Risk Değerlendirme Metodu Kullanılarak İSG Ve Üretime Olan Etkilerinin İncelenmesi, (Yüksek Lisans Tezi, Altınbaş Üniversitesi, İstanbul, Türkiye)
- Flores, C.D, (2013). Virtual simulators provide realistic training. Erişim Tarihi: 1 Ocak 2024, <https://www.jbmdl.jb.mil/News/Article/243602/virtualsimulators-provide-realistic-training>

- Garbie, I. (2016). Sustainability in Manufacturing Enterprises Concepts, *Analyses and Assessments for Industry 4.0..* Switzerland: Springer
- Grieves, M. (2014). Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication. *White Paper*, 1, 1-7.
- Hempel, V. (2017). Healthcare solution testing for future. Digital Twins in healthcare. Erişim Tarihi: 31 Aralık 2024, <https://www.drhempel-network.com/digital-health-technology/digital-twins-in-healthcare/>
- İçen, D. & Günay, S. (2014). Uzman Sistemler ve İstatistik. *İstatistikçiler Dergisi: İstatistik ve Aktüerya*, 7(2), 37-45.
- Jackson, P. (1986). *Introduction to expert systems*, İngiltere: Addison Wesley Publisher.
- Kabaklarlı, E. (2016). *Endüstri 4.0 ve paylaşım ekonomisi: Dünya ve Türkiye ekonomisi için fırsatlar, etkiler ve tehditler*. Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.
- Kılıç, Ekici, Ö. (2012). Üç boyutlu yazıcı teknolojisi. *Bilim ve Teknik Dergisi*, 541, 24-29.
- Kutlusoy, Z. (2019). Felsefe açısından yapay zeka. G. Telli (ed.), *Yapay zeka ve gelecek* (ss. 25-43), İstanbul: Doğu Kitapevi.
- Le Cun Y., Jackle D.L., Boser, B.E., Denker J.S., Graf H.P., Guyon I., Henderson D., Howard R., Hubbard W. (1989), Handwritten digit recognition: applications of neural network chips and automatic learning, *IEEE Commun. Mag.*, 27(11), 41-46.
- McCarthy, J. (2007). From here to human-level AI. *Artificial Intelligence*, 171(18), 1174-1182. <https://doi.org/10.1016/j.artint.2007.10.009>.
- Meydan, C., (2015). Dünya Ordularında Yeniden Yapılanmanın Kaynakları Üzerine Bir İnceleme. *Güvenlik Stratejileri Dergisi*, 11(21), 1-39
- Mikolov, T., Karafiát, M., Burget, L., Cernocký, J., & Khudanpur, S. (2010). Recurrent neural network based language model. *Proceedings of Interspeech*, 2(3), 1045-1048.
- Min, H. (2010). Artificial intelligence in supply chain management: theory and applications. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 13-39. doi:<http://dx.doi.org/10.1080/13675560902736537>
- Ozawa, S., Ban, T., Hashimoto, N., Nakazato, J., Shimamura, J. (2020). A study of IoT malware activities using association rule learning for darknet sensor data. *International Journal of Information Security*, 19, 83-92.
- Özcan, A. (2021). Büyük veri: Fırsatlar ve tehditler. *Trt Akademi*, 6(11), 10-31.
- Özen, H. (2019), “Endüstri 4.0 ve Eğitim: Bir Türkiye Perspektifi”, *Anemon Muş Alparslan Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 7(5), 103-113
- Özsoylu, A.F. (2017), “Endüstri 4.0”, *Çukurova Üniversitesi İİBF Dergisi*, 21(1), 52-60.
- Öztemel, E. (2020). Yapay Zekâ ve İnsanlığın Geleceği. *Bilişim Teknolojileri ve İletişim: Birey ve Toplum Güvenliği* (ss.96-112), Ankara: Türkiye Bilimler Akademisi.
- Öztemel, E. (2003). *Yapay sinir ağları*. İstanbul: Papatya Yayıncılık.

- Öztuna, B., (2017), *Endüstri 4.0 Dördüncü Sanayi Devrimi ile Çalışma Hayatının Geleceği*. Ankara: Gece Kitaplığı.
- Öztürk, K. & Şahin, M. E. (2018). Yapay sinir ağları ve yapay zekâ'ya genel bir bakış. *Takvim-i Vekayi*, 6(2), 25-36.
- Pan, Y. (2016). Heading toward artificial intelligence 2.0. *Engineering*, 2(4), 409-413.
- Sariel, S. (2017). Günümüzde Yapay Zeka. M. Karaca (Ed.) içinde, *İnsanlaşan Makineler ve Yapay Zekâ* (s. 21-25). İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Vakfı.
- Savaş, S. Topaloğlu, N., & Yılmaz, M. (2012). Veri madenciliği ve Türkiye'deki uygulama örnekleri. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(21), 1-23.
- Schultz, D. P., Ellen-Schultz, S. (2007). Modern psikoloji tarihi (Y. Aslay, Çev.). İstanbul: Kaknüs Yayınları.
- Solak, S., & Altınışik, U. (2018). Görüntü işleme teknikleri ve kümeleme yöntemleri kullanılarak fındık meyvesinin tespit ve sınıflandırılması. *Sakarya University Journal of Science*, 22(1), 56-65.
- Song, H. A., Lee, S. Y. (2013). Hierarchical representation using NMF. Lee, M., Hirose, A., Hou, ZG., Kil, R.M. (Ed.), *Neural Information Processing*. (ss. 466-473). Berlin: Springer Berlin Heidelberg
- Tonga, M. Y., & Tonga, M. (2022). Endüstri 4.0'a Genel Bir Bakış: Sanayinin Geleceği. *GÜ İslahiye İibf Uluslararası E-Dergi*, 6(6), 40-60.
- Tunzelmann, V. N. (2003). Historical coevolution of governance and technology in the industrial revolutions. *Structural Change and Economic Dynamics*, 14(4), 365-384.
- Turing, A. M. (1980). Computing machinery and intelligence. *Creative Computing*, 6(1), 23-65. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6710-5\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6710-5_3)
- Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit Y., Jones L., Gomez A.N., Kaiser L., Polosukhin I. (2017). Attention is all you need. *Advances in neural information processing systems*, 30. ABD: Curran Associates Inc. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762>
- Wang, Y., Wagner, N., & Rondinelli, J. M. (2019). Symbolic regression in materials science. *MRS communications*, 9(3), 793-805.
- Waterman, D. A. (1985). *A guide to expert systems*. İngiltere: Addison-Wesley Longman Publishing Company.
- Wu, J., Yang, Y., Cheng, X., Zuo, H., & Cheng, Z. (2020). The Development of Digital Twin Technology Review. 2020 Chinese Automation Congress (CAC), 4901-4906. <https://doi.org/10.1109/CAC51589.2020.9327756>
- Yapıcıoğlu, N. (1991). Uzman sistemler ve uygulamaları (Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye). Erişim adresi: <http://hdl.handle.net/11527/22072>
- Zhou, M., Nan D., Shujie L., ve Heung-Yeung S., (2020). Sinirsel doğal dil işlemedeki son gelişmeler: modeller, eğitim ve akıl yürütme. *Mühendislik*, 6 (3), 275-290.



# Bölüm 16

**ENERJİ ÜRETİMİNDE NANOTEKNOLOJİK  
SİSTEMLER: MALZEME TASARIMI,  
TEMEL MEKANİZMALAR VE YENİ NESİL  
UYGULAMALAR**

*Zehra Nur OZER<sup>1</sup>*

## GİRİŞ

Küresel nüfusun hızlı artışı, sanayileşme ve teknolojik gelişmeler, dünya genelinde enerji talebinin sürekli olarak artmasına neden olmaktadır. Literatürde yapılan çok sayıda çalışma, özellikle gelişmekte olan ekonomilerde enerji tüketiminin önümüzdeki yıllar boyunca belirgin biçimde artacağını ve bunun mevcut enerji altyapıları ile doğal kaynaklar üzerinde ciddi bir baskı oluşturacağını ortaya koymaktadır (Smil, 2017; Chu & Majumdar, 2012). Yenilenebilir enerji teknolojilerindeki gelişmelere rağmen, fosil yakıtlar günümüzde küresel enerji kapsamında hâlen konumunu korumakta ve birincil enerji tüketiminin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır.

Fosil yakıtların yaygın kullanımı, başta sera gazı salımları ve hava kirliliği olmak üzere ciddi çevresel sorunlara yol açmıştır. Kömür, petrol ve doğal gazın yanması, antropojenik karbondioksit emisyonlarının temel kaynağı olmuştur. Bu emisyonların küresel ısınma, iklim değişikliği gibi hava olaylarıyla doğrudan ilişkili olduğu bilimsel olarak ortaya konmuştur (IPCC, 2014; Aberg & Henning et al., 2011). Bu çevresel etkiler, fosil yakıt rezervlerinin giderek azalmasıyla birleştiğinde; daha temiz, sürdürülebilir ve çevre dostu alternatif enerji üretim yollarına olan gereksinimi kaçınılmaz hâle getirmiştir.

Bu kapsamda, sürdürülebilir enerji sistemlerine geçiş, yalnızca yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılmasını değil; aynı zamanda enerji dönüşüm verimliliğini, sistem güvenilirliğini ve çevresel uyumluluğu önemli ölçüde artıracak ileri malzeme ve teknolojilerin geliştirilmesini de zorunlu kılmaktadır (Chu & Majumdar, 2012). Enerji teknolojilerinde verimlilik artışı sağlayabilecek yenilikçi yaklaşımlar, küresel ölçekte enerji güvenliği ve iklim değişikliği ile mücadele açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Nanoteknoloji, malzeme özelliklerinin nanometre ölçeğinde hassas biçimde kontrol edilmesine olanak tanıyarak, geleneksel enerji sistemlerinin sınırlamalarını aşmaya yönelik dönüştürücü bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır. Bu ölçekte malzemeler, kuantum sınırlanma etkileri, artmış yüzey reaktivitesi ve değiştirilmiş elektronik bant yapıları gibi, hacimsel (bulk) malzemelerde gözlenmeyen boyuta bağlı fiziksel ve kimyasal özellikler sergilemektedir (Dresselhaus et al., 2007; Poizot & Dolhem, 2011). Nano-ölçekli bu etkiler, enerji üretim ve dönüşüm sistemlerinin performansını artırmak amacıyla stratejik olarak kullanılabilir.

Nanoteknolojinin sunduğu en önemli avantajlardan biri, nanoyapılı malzemelerin yüksek yüzey/hacim oranıdır. Bu özellik gelişmiş katalitik aktivite, daha hızlı reaksiyon kinetikleri ve daha verimli yük taşınımı sağlayarak enerji sistemlerinin genel verimliliğini artırmaktadır. Bu etkiler özellikle fotovoltaik sistemler, hidrojen üretimi ve yakıt hücreleri gibi arayüz süreçlerinin belirleyici olduğu enerji teknolojilerinde kritik öneme sahiptir (Turner, 2004; Polman et al., 2016). Ayrıca nano-ölçekli mühendislik yaklaşımları, optik soğurma, taşıyıcı hareketliliği ve ısı taşınım özelliklerinin hassas biçimde ayarlanmasına olanak tanıyarak çok çeşitli uygulamalarda enerji dönüşüm verimliliğinin artırılmasını mümkün kılmaktadır.

Bunun yanında, enerji malzemeleri artık yalnızca kimyasal bileşimlerine göre değil, atomik ve moleküler düzeydeki yapısal tasarımları üzerinden de geliştirilebilmektedir. Bu yaklaşım, geleneksel enerji teknolojilerinin verimlilik ve dayanıklılık sınırlamalarını aşmaya yönelik çok işlevli, hafif ve

yüksek performanslı malzemelerin geliştirilmesine olanak sağlamıştır (Was, 2017). Günümüzde nanoteknoloji, yeni nesil enerji üretim sistemleri için temel bir platform hâline gelmiştir.

## 2. NANOTEKNOLOJİNİN ENERJİ SİSTEMLERİNDEKİ TEMELLERİ

Nanoteknoloji, atomik ve moleküler ölçeklerde materyallerin tasarımı, üretimi ve uygulamasını kapsayan disiplinler arası bir araştırma alanıdır. Nanomalzemeler genellikle 1–100 nm boyut aralığında tanımlanmaktadır. Bu ölçekte malzemelerin optik, elektronik, mekanik ve kimyasal özellikleri klasik katı hâl malzemelerden belirgin biçimde ayrılmaktadır (Bhushan, 2017; Roduner, 2006). Bu boyut aralığında ortaya çıkan özgün özellikler, enerji dönüşüm ve üretim süreçlerinin verimliliğini doğrudan etkileyebilmektedir. Özellikle yüzey/hacim oranının önemli ölçüde artması, reaktif yüzey alanını genişletmekte ve yük taşıma davranışının optimize edilmesini mümkün kılmaktadır. Bu nedenle nanoteknoloji, enerji uygulamalarında yalnızca bir malzeme geliştirme aracı değil, aynı zamanda makro ölçekli sistem performansını artıran fonksiyonel bir tasarım ilkesi olarak öne çıkmaktadır.

Nanoteknolojinin enerji alanında uygulanmasının temelinde, nanomalzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinde gözlenen ölçek bağımlı davranışlar yer almaktadır. Nano-ölçekte elektronların yeniden düzenlenmesi, kuantum sınırlanma etkileri, yüzey enerjisindeki artış ve aktif bölge yoğunluğunun yükselmesi gibi faktörler; fotovoltaiik süreçlerde ışık absorpsiyonunun iyileştirilmesi, katalitik aktivitenin artırılması ve enerji taşıyıcılarının (elektron ve iyonlar gibi) daha etkin biçimde kontrol edilmesini mümkün kılmaktadır (Nozik, 2002; Poizot & Dolhem, 2011). Bu bağlamda nanomalzemelerin enerji üretim sistemlerine entegrasyonu, enerji verimliliğinin artırılması ve yeni enerji dönüşüm mekanizmalarının geliştirilmesiyle doğrudan ilişkilidir.

Enerji uygulamalarında kullanılan nanomalzemeler, genellikle boyut ve morfolojik özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır. Sıfır boyutlu (0D) nanomalzemeler arasında kuantum noktalar ve nanoparçacıklar yer alırken; bir boyutlu (1D) nanomalzemeler nanoteller ve nanorodlar ile temsil edilmektedir. İki boyutlu (2D) nanomalzemeler grafen ve ince film yapılar gibi düzlemsel sistemleri kapsarken, üç boyutlu (3D) nanokompozit sistemler farklı nano yapıların hiyerarşik biçimde bir araya getirilmesiyle oluşturulmaktadır (Cao & Wang, 2011). Bu nanoyapılar, sahip oldukları geniş yüzey alanı sayesinde fizikokimyasal süreçlerde aktif merkezlerin sayısını artırarak enerji sistemlerinde önemli verimlilik kazanımları sağlamaktadır.

Örneğin grafen ve karbon nanotüpler, yüksek elektriksel iletkenlikleri, mekanik dayanımları ve kimyasal kararlılıkları sayesinde güneş pilleri, süperkapasitörler ve elektrokatalitik enerji sistemlerinde performans artışı sağlayan kritik nanomalzemeler arasında yer almaktadır (Geim & Novoselov, 2007; Dai, 2002). Benzer şekilde, nanomalzemelerin optik ve elektronik özelliklerinin ayarlanabilir (tunellenebilir) olması, enerji uygulamalarında önemli avantajlar sunmaktadır. Bu bağlamda, yukarı dönüşüm yapan (upconverting) nanoparçacıklar (UCNPs) gibi ileri nanoyapılar, düşük enerjili fotonları daha yüksek enerjili fotonlara dönüştürerek güneş hücrelerinin spektral etkinliğini artırabilmektedir (Auzel, 2004). Bu mekanizma, güneş ışığından daha yüksek oranda enerji elde edilmesine olanak sağlamaktadır.

Nanoteknoloji, enerji üretim sistemlerinde etkinliği artıran birden fazla temel mekanizmayı eş zamanlı olarak devreye sokmaktadır. Nanoyapılı yüzeyler, gelen fotonların daha etkin biçimde absorbe edilmesini sağlayarak elektron–delik çiftlerinin oluşumunu artırmakta; bu durum özellikle

nanoyapılı fotovoltaik ve fotokatalitik sistemlerde kritik rol oynamaktadır (Polman et al., 2016). Bunun yanı sıra, nanomalzemelerin yüksek iletkenlik ve yüzey alanı özellikleri, enerji taşıyıcılarının daha hızlı ve düşük kayıpla taşınmasına olanak vererek yük iletim süreçlerini iyileştirmektedir. Ayrıca nanokatalizörler, hidrojen üretimi gibi reaksiyonlarda daha düşük aktivasyon enerjileri ile daha yüksek reaksiyon hızları sağlayarak enerji dönüşüm süreçlerini optimize etmektedir (Turner, 2004).

Bu mekanizmaların bütüncül etkisi, nanoteknolojik malzemelerin enerji üretim sistemlerini yalnızca performans açısından geliştirmekle kalmayıp, aynı zamanda daha düşük çevresel etkiye sahip sürdürülebilir enerji çözümlerinin geliştirilmesini mümkün kıldığını göstermektedir. Bu nedenle nanoteknoloji, 21. yüzyılın enerji sorunları bağlamında yalnızca destekleyici bir teknoloji değil; stratejik ve dönüştürücü bir çözüm bileşeni olarak değerlendirilmektedir.

### **3.NANOMALZEMELERİN YENİLENEBİLİR ENERJİ ÜRETİMİNDEKİ UYGULAMALARI**

#### **3.1.Nanoteknolojinin Yenilenebilir Enerji Üretimindeki Rolü**

Yenilenebilir enerji üretimi, artan küresel enerji talebinin çevresel sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda karşılanabilmesi açısından stratejik bir öneme sahiptir. Fosil yakıt temelli enerji sistemlerinin yol açtığı karbon salımları, iklim değişikliği ve çevresel bozulmalar, enerji üretiminde temiz ve yenilenebilir kaynaklara yönelimi zorunlu hâle getirmiştir. Bu dönüşüm sürecinde yalnızca enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi yeterli olmayıp; aynı zamanda enerji dönüşüm ve üretim verimliliğini artırabilecek ileri malzeme ve teknoloji çözümlerinin geliştirilmesi de kritik bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır (Lewis & Nocera, 2006).

Nanoteknoloji, atomik ve moleküler ölçekte malzemelerin yapısal ve fonksiyonel özelliklerinin hassas biçimde kontrol edilmesine olanak tanıyarak, yenilenebilir enerji sistemlerinin performansını köklü biçimde iyileştirme potansiyeline sahiptir. Nanoyapılı malzemeler; yüksek yüzey/hacim oranları, kuantum sınırlanma etkileri ve ayarlanabilir optoelektronik özellikleri sayesinde, enerji üretim süreçlerinde daha etkin ışık soğurumu, gelişmiş yük taşıma davranışı ve artırılmış katalitik aktivite sunmaktadır (Poizot & Dolhem, 2011; Was, 2017).

#### **3.2.Nanoteknolojinin Güneş Enerjisi Sistemlerindeki Rolü**

Güneş enerjisinin doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmesinde kullanılan fotovoltaik (PV) sistemler, yenilenebilir enerji teknolojileri arasında en yaygın uygulama alanına sahiptir. Bununla birlikte, geleneksel silikon tabanlı güneş hücreleri; ışık yansımaları, sınırlı spektral soğurma ve taşıyıcı yeniden birleşme kayıpları gibi temel verimlilik kısıtlamalarına sahiptir. Nanoteknolojik yaklaşımlar, bu sınırlamaların aşılmasında etkili çözümler sunmaktadır (Green, 2016).

Nanoyapılı yüzey dokuları, nanoteller, nanorodlar ve iki boyutlu malzemeler (örneğin grafen ve geçiş metali dikalkojenitleri) gelen güneş ışığının hücre içerisinde daha etkin biçimde hapsedilmesini sağlayarak optik kayıpları azaltmaktadır. Bu yapıların sunduğu geniş yüzey alanı ve yüksek elektriksel iletkenlik, foton-soğurma verimliliğini ve yük taşıyıcı ayrışmasını önemli ölçüde artırmaktadır (Polman et al., 2016).



Metalik nanoparçacıklara dayalı plasmonik nanoyapılar (serbest elektron yoğunluğu yüksek metallere oluşan ve ışıkla etkileşimlerinde yüzeydeki serbest elektronların kolektif salınımını uyaran nano-ölçekli yapılar) fotovoltaik sistemlerde ışık-madde etkileşimini güçlendiren bir diğer önemli stratejidir. Altın ve gümüş gibi metallere oluşan nanoparçacıklar, yüzey plazmon rezonansı sayesinde elektromanyetik alanı yerel olarak yoğunlaştırarak aktif katmanda daha fazla foton soğurulmasına olanak tanımaktadır. Bu mekanizma, özellikle ince film güneş hücrelerinde dönüşüm verimliliğini artıran etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır (Atwater & Polman, 2010).

Bunun yanı sıra, nanoteknoloji; organik ve perovskit tabanlı güneş hücrelerinde yalnızca verimliliği değil, aynı zamanda uzun dönemli kararlılığı da artıran yüzey pasivasyonu ve ara yüz mühendisliği yaklaşımlarının geliştirilmesine imkân sağlamaktadır. Bu gelişmeler esnek, hafif ve düşük maliyetli yeni nesil güneş enerjisi sistemlerinin önünü açmaktadır (Park et al., 2016).

### 3.3. Nanoteknolojinin Hidrojen Üretimindeki Uygulamaları

Hidrojen, birim kütle başına yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması ve enerji dönüşümü sırasında çevreye yalnızca su salması nedeniyle, sürdürülebilir enerji sistemlerinde stratejik bir enerji taşıyıcısı olarak değerlendirilmektedir. Ancak hidrojenin çevre dostu biçimde üretilebilmesi, mevcut teknolojik sınırlamalar nedeniyle önemli bilimsel ve mühendislik zorluklarını da beraberinde getirmektedir (Turner, 2004).

Nanomalzemeler, özellikle fotokatalitik ve elektrokatalitik su ayrışması süreçlerinde hidrojen üretim verimliliğini artırmak amacıyla yaygın biçimde kullanılmaktadır. Yarıiletken nanoyapılar, güneş ışığını doğrudan kimyasal enerjiye dönüştürerek su moleküllerinin hidrojen ve oksijen bileşenlerine ayrılmasını mümkün kılmaktadır. Bu süreçte nano-ölçekli katalizörler, geniş aktif yüzey alanları ve kısa yük taşıma mesafeleri sayesinde reaksiyon kinetiğini belirgin şekilde iyileştirmektedir (Bhatt & Lee, 2017).

Nanoyapılı  $TiO_2$ , hematit ( $\alpha-Fe_2O_3$ ) ve benzeri metal oksitler; uygun bant aralığı, kimyasal kararlılık ve maliyet avantajları nedeniyle hidrojen üretiminde yaygın olarak araştırılmaktadır. Özellikle bir boyutlu nanoyapılar (nanoteller ve nanorodlar), foton soğurumu ile oluşan elektron-delik çiftlerinin yeniden birleşmesini azaltarak yük ayrışma verimliliğini artırmaktadır (Kment et al., 2020).

Son yıllarda geliştirilen hibrit nanomalzemeler, yarıiletken fotokatalizörlerin plazmonik veya geçiş metali bazlı katalizörlerle birleştirilmesi yoluyla hidrojen üretim performansını daha da ileri taşımıştır. Bu hibrit yapılar, güneş spektrumunun daha geniş bir bölümünden yararlanarak hem ışık hasadını hem de katalitik aktiviteyi eş zamanlı olarak optimize etmeyi hedeflemektedir (Walter et al., 2010).

### 3.4. Nanomalzemelerle Biyokütle ve Bio-hidrojen Üretimi

Nanoteknoloji, yenilenebilir enerji üretiminde yalnızca güneş ve su ayrışmasına dayalı hidrojen sistemleriyle sınırlı kalmayıp, biyokütleden enerji ve yakıt üretim süreçlerinde de önemli katkılar sunmaktadır. Tarımsal atıklar, algler ve organik artıklar gibi biyokütle kaynakları; uygun katalitik ve fotokatalitik yaklaşımlar kullanıldığında, biohidrojen ve diğer biyoyakıtların üretimi için sürdürülebilir bir hammadde potansiyeli taşımaktadır (Huber, Iborra, & Corma, 2006).

Nanoyapılı katalizörler, biyokütlenin fotokatalitik veya termokatalitik parçalanmasında yüksek yüzey alanı, ayarlanabilir aktif merkezler ve geliştirilmiş yük transferi özellikleri sayesinde geleneksel katalizörlere kıyasla daha yüksek dönüşüm verimleri sağlamaktadır. Özellikle metal oksit, sülfür ve karbon bazlı nanokompozitler, biyokütle kökenli organik moleküllerin daha düşük enerji bariyerleri ile parçalanmasına olanak tanımaktadır (Chen et al., 2020).

Bu süreçler yalnızca yenilenebilir yakıt üretimine katkı sağlamakla kalmaz; aynı zamanda atık yönetimi ve karbon döngüsünün kapatılması açısından da çevresel sürdürülebilirliği destekler. Nano-ölçekli yapısal optimizasyonlar, biyokütle dönüşümünde karşılaşılan kütle transfer sınırlamaları ve katalizör deaktivasyonu gibi temel darboğazların aşılmasına yardımcı olmaktadır. Son yıllarda geliştirilen ileri karakterizasyon ve nanoyapı analiz teknikleri, biyokütle-nanokatalizör etkileşimlerinin daha iyi anlaşılmasını sağlayarak proses maliyetlerinin düşürülmesine katkı sunmaktadır (Zhang & Hu, 2018).

### 3.5. Endüstriyel Ölçeklenebilirlik ve Zorluklar

Nanoteknolojik yaklaşımlar, laboratuvar ölçeğinde yenilenebilir enerji üretim sistemlerinde kayda değer performans artışları sağlamasına rağmen, bu teknolojilerin endüstriyel ölçekte uygulanması hâlen önemli zorluklar içermektedir. Nanomalzemelerin kontrollü sentezi, yüksek saflık gereksinimleri ve üretim süreçlerinin tekrarlanabilirliği, ticari ölçeklenebilirliğin önündeki temel engeller arasında yer almaktadır (Armaroli & Balzani, 2011).

Bunun yanı sıra nanomalzemelerin yaşam döngüsü boyunca çevresel, sağlık ve güvenlik (EHS) riskleri dikkatle değerlendirilmelidir. Nano-boyutlu parçacıkların çevredeki davranışları, biyobirikimi ve geri dönüşüm süreçleri, enerji teknolojilerinin sürdürülebilirliği açısından kritik araştırma alanları olarak öne çıkmaktadır (Owen & Depledge, 2005). Bu nedenle nanoteknoloji tabanlı enerji sistemlerinin geliştirilmesinde, yalnızca performans değil; çevresel etki analizleri ve düzenleyici çerçevelerle uyum da temel bir gereklilik hâline gelmiştir.

### 3.6. Nanoteknoloji Destekli Hidrojen ve Yakıt Hücreleri Sistemleri

Nanoteknoloji, sürdürülebilir enerji üretimi bağlamında özellikle hidrojen enerjisi ve yakıt hücresi teknolojilerinde stratejik bir rol üstlenmektedir. Hidrojen; yüksek enerji yoğunluğu ve kullanım sırasında karbon bazlı emisyon üretmemesi nedeniyle, geleceğin temiz enerji taşıyıcılarından biri olarak değerlendirilmektedir (Turner, 2004). Nanomalzemeler, hidrojen üretiminden yakıt hücresi bileşenlerine kadar geniş bir yelpazede sistem performansını artırmak amacıyla kullanılmaktadır.

### 3.7. Nanoteknolojinin Hidrojen Üretimindeki Rolü

Hidrojenin sürdürülebilir üretimi, ağırlıklı olarak fotokatalitik ve elektrokatalitik su ayrışması süreçlerine dayanmaktadır. Bu süreçlerde kullanılan nanoyapılı katalizörler; yüksek aktif yüzey alanı, ayarlanabilir bant aralığı ve geliştirilmiş yük ayrışma özellikleri sayesinde hidrojen üretim verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır (Walter et al., 2010).

Metal oksit yarıiletkenler (örneğin  $TiO_2$  ve  $ZnO$ ) ve karbon bazlı nanokompozitler, nano-ölçekli yapılandırıldıklarında elektron-delik çiftlerinin yeniden birleşmesini baskılayarak daha etkin hidrojen oluşumuna olanak tanımaktadır. Ayrıca plazmonik nanoparçacıkların kullanımı, güneş spektrumunun

daha geniş bir bölümünün değerlendirilmesini sağlayarak fotokatalitik etkinliği artırmaktadır (Atwater & Polman, 2010).

Biyokütle ve organik atıklardan hidrojen üretimine yönelik geliştirilen nanokatalitik sistemler ise enerji üretimi ile atık dönüşümünü bir arada ele alan bütüncül yaklaşımlar sunmaktadır. Bu stratejiler, hem çevresel etkiyi azaltmayı hem de ekonomik uygulanabilirliği artırmayı hedeflemektedir (Ni et al., 2006).

### 3.8. Nanoteknolojinin Yakıt Hücreleri Teknolojisine Entegrasyonu

Yakıt hücreleri, hidrojenin elektrokimyasal reaksiyonlar yoluyla doğrudan elektrik enerjisine dönüştürüldüğü yüksek verimli sistemlerdir. Bu sistemlerin performansı büyük ölçüde elektrot, katalizör ve membran malzemelerinin özelliklerine bağlıdır (Larminie & Dicks, 2003).

Nanomalzemeler, özellikle elektrokatalizörlerde kullanılan değerli metal miktarını azaltırken yüksek katalitik aktivite sağlaması açısından kritik öneme sahiptir. Nano-ölçekli platin ve platin alaşımları, oksijen indirgeme ve hidrojen oksidasyon reaksiyonlarını daha etkin hâle getirerek yakıt hücresi verimini artırmaktadır (Debe, 2012).

Membran ve elektrot yapılarının nano-tasarımı, proton iletkenliği, gaz difüzyonu ve su yönetimi gibi temel parametrelerin optimize edilmesini mümkün kılmaktadır. Yüksek sıcaklık yakıt hücrelerinde ise nano-ölçekli seramik ve metal oksitler, iyon iletkenliği ve termal dayanıklılığı artırarak sistem ömrünü uzatmaktadır (Singhal & Kendall, 2003).

## 4. Nanoteknolojik İyileştirmelerin Avantajları ve Zorlukları

Nanomalzemelerin sunduğu performans avantajlarına karşın, uzun dönemli stabilite, yüksek sıcaklık ve korozyon ortamlardaki davranışlar gibi konular hâlen araştırma aşamasındadır. Ayrıca üretim maliyetleri ve büyük ölçekli sentez zorlukları, teknolojilerin ticari yaygınlaşmasını sınırlayan faktörler arasında yer almaktadır (Arico et al., 2005).

Buna ek olarak, nanomalzemelerin çevresel ve biyolojik etkileri, güvenli kullanım ve bertaraf süreçlerinin dikkatle planlanmasını gerektirmektedir. Bu nedenle performans odaklı tasarımların, çevresel sorumluluk ve yaşam döngüsü analizleriyle birlikte ele alınması büyük önem taşımaktadır.

Nanoteknoloji tabanlı hidrojen üretimi ve yakıt hücresi sistemleri, enerji dönüşüm süreçlerinde daha yüksek verimlilik ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılması açısından güçlü bir potansiyel sunmaktadır. Yeni nesil nanokatalizörler, hibrit nanokompozit yapılar ve gelişmiş membran teknolojileri, gelecekte düşük maliyetli ve çevre dostu enerji sistemlerinin geliştirilmesine öncülük edecektir (Lewis & Nocera, 2006).

## 5. Enerji Üretimi ve Enerji Depolama Arayüzünde Nanoteknolojinin Rolü

Yenilenebilir enerji kaynaklarının doğası gereği süreksiz ve çevresel koşullara bağımlı olması, enerji üretimi ile tüketimi arasındaki dengenin sağlanmasını önemli ölçüde zorlaştırmaktadır. Güneş ve rüzgâr gibi kaynaklardan elde edilen enerjinin güvenilir biçimde kullanılabilmesi, etkin enerji depolama çözümlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda enerji üretimi ile enerji

depolama sistemleri arasındaki arayüz, modern enerji altyapılarının performansını belirleyen kritik bir bileşen hâline gelmiştir (Dunn, Kamath, & Tarascon, 2011).

Nanoteknoloji, bu arayüzün hem elektrokimyasal hem de yapısal düzeyde optimize edilmesine olanak tanıyarak bataryalar, süperkapasitörler ve hibrit enerji depolama sistemlerinin verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Nano-ölçekli elektrot ve aktif malzemeler, iyon difüzyon mesafelerini kısaltmakta; bu sayede enerji depolama kapasitesi, güç yoğunluğu ve çevrim ömrü gibi temel performans parametrelerinde kayda değer iyileşmeler sağlamaktadır.

### 5.1. Enerji Üretimi ve Depolama Sistemlerinin Entegrasyonu

Geleneksel enerji altyapılarında üretim ve depolama teknolojileri çoğunlukla birbirinden bağımsız olarak tasarlanmıştır. Ancak dağıtık enerji sistemleri, mikroşebekeler ve akıllı şebekelerin yaygınlaşmasıyla birlikte, entegre üretim–depolama yaklaşımları giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu sistemlerde temel amaç, üretilen enerjinin minimum kayıpla depolanması ve talep anında yüksek verimle geri kazanılmasıdır (Larcher & Tarascon, 2015).

Nanomalzemeler, enerji üretim birimleri ile depolama bileşenleri arasındaki yük transfer direncini azaltarak bu entegrasyonu mümkün kılan temel yapı taşlarından biridir. Nano-ölçekli elektrot ve ara yüzey mühendisliği, fotovoltaik hücreler ile bataryalar veya süperkapasitörler arasındaki enerji akışını iyileştirerek daha hızlı şarj, daha yüksek enerji yoğunluğu ve uzun çevrim ömrü gibi avantajlar sunmaktadır. Özellikle güneş enerjisi–batarya hibrit sistemlerinde nanoteknoloji, sistem performansını bütüncül biçimde artıran kritik bir rol üstlenmektedir (Bruce, Freunberger, Hardwick, & Tarascon, 2012).

### 5.2. Enerji Dönüşüm–Depolama Arayüzlerinde Nanomalzemeler

Enerji üretimi ile depolama arasındaki en kritik aşama, bu iki süreci birbirine bağlayan elektrokimyasal arayüzlerdir. Bu arayüzlerde gerçekleşen iyon ve elektron taşınımı, sistemin genel verimliliğini doğrudan belirlemektedir. Nanoteknoloji, yüksek özgül yüzey alanı, ayarlanabilir porozite ve kısa difüzyon yolları sayesinde bu arayüzlerdeki kinetik sınırlamaları önemli ölçüde azaltmaktadır (Simon & Gogotsi, 2008).

Grafen, karbon nanotüpler ve hiyerarşik nanokarbon yapılar gibi karbon bazlı nanomalzemeler, yüksek elektriksel iletkenlikleri ve kimyasal kararlılıkları sayesinde enerji üretimi–depolama entegrasyonlarında öne çıkmaktadır. Bu malzemeler, elektron taşınımını hızlandırırken aynı zamanda mekanik stabilite sağlayarak sistemlerin uzun süreli çalışmasına katkıda bulunmaktadır (Zhang & Zhao, 2009).

Nanomalzemelerin bir diğer önemli katkısı, iyon taşınımının kontrol edilebilir hâle gelmesidir. Nano-ölçekli elektrot ve elektrolit tasarımları, iyonların daha kısa mesafelerde ve daha düşük dirençle hareket etmesini sağlayarak enerji kayıplarını azaltmaktadır. Bu özellik, özellikle yüksek güç gerektiren ve hızlı şarj–deşarj döngülerine sahip uygulamalarda kritik öneme sahiptir (Miller & Simon, 2008).

### 5.3.. Üretim–Depolama Hibrit Sistemlerinde Nanoteknoloji

Nanoteknolojinin sunduğu en yenilikçi yaklaşımlardan biri, enerji üretimi ve depolamanın tek bir sistem içinde birleştirilmesidir. Bu hibrit yapılarda, enerji üretimi sırasında oluşan yükler doğrudan depolama birimine aktarılmakta ve ara dönüşüm kayıpları minimize edilmektedir. Fotokapasitörler ve fotobataryalar, bu yaklaşımın öne çıkan örnekleri arasında yer almakta olup, güneş ışığını absorbe ederek eş zamanlı olarak elektrik üretimi ve depolama gerçekleştirebilmektedir (Wang et al., 2014).

Bu sistemlerde kullanılan nanomalzemeler, hem ışık soğurucu hem de enerji depolayıcı fonksiyonları bir arada sunabilmektedir. Metal oksit nanoyapılar, perovskit tabanlı nanomalzemeler ve nanokarbon kompozitler, çift işlevli bu mimarilerde yaygın biçimde araştırılmaktadır. Bu yaklaşım, sistem karmaşıklığını azaltırken toplam enerji dönüşüm verimliliğini artırmaktadır (Yu et al., 2016).

Ayrıca triboelektrik ve piezoelektrik nanogeneratörlerin süperkapasitörlerle entegrasyonu, mekanik enerjinin anlık olarak depolanmasını mümkün kılmaktadır. Bu tür nano-entegre sistemler, giyilebilir elektronikler, otonom sensörler ve düşük güç gerektiren IoT uygulamaları için önemli bir potansiyel taşımaktadır.

### 5.4. Zorluklar ve Gelecek Perspektifleri

Nanoteknolojinin enerji üretimi ve depolama arayüzünde sunduğu avantajlara rağmen, bazı temel zorluklar varlığını sürdürmektedir. Nanomalzemelerin uzun dönemli stabilitesi, üretim maliyetleri ve büyük ölçekli üretim süreçlerinin standardizasyonu bu zorlukların başında gelmektedir (Larcher & Tarascon, 2015). Ayrıca nanomalzemelerin çevresel etkileri ve geri dönüşüm süreçleri, sürdürülebilirlik açısından dikkatle değerlendirilmelidir.

Gelecekte yapay zekâ destekli malzeme tasarımı, çok işlevli nanokompozitler ve modüler hibrit enerji sistemleri, üretim–depolama entegrasyonunu daha verimli ve ekonomik hâle getirecektir. Bu bağlamda nanoteknoloji, yalnızca enerji üretimini veya depolamayı iyileştiren bir araç değil; enerji sistemlerini bütüncül biçimde yeniden tanımlayan stratejik bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır.

## 6. Ortaya Çıkan Uygulamalar ve Gelecek Eğilimler

Nanoteknolojinin enerji üretim sistemlerindeki rolü, olgunlaşmış uygulamaların ötesine geçerek çok disiplinli, akıllı ve otonom sistemlere doğru evrilmektedir. Güncel araştırmalar, nanomalzemelerin yalnızca enerji dönüşüm verimliliğini artırmakla kalmayıp; kendi kendine yeten, ölçeklenebilir ve dijital olarak optimize edilebilir enerji sistemlerinin geliştirilmesine de olanak tanıdığı göstermektedir (Zhang et al., 2020).

### 6.1 Akıllı ve Kendi Kendine Güç Sağlayan Sistemler

Nanoteknoloji tabanlı triboelektrik ve piezoelektrik nanogeneratörler, çevresel enerjinin doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlayarak kendi kendine güç sağlayan sistemlerin temelini oluşturmaktadır (Wang & Wang, 2019). Bu sistemler, özellikle giyilebilir elektronikler ve uzaktan izleme uygulamaları için önemli avantajlar sunmaktadır.

## 6.2 Yapay Zekâ Destekli Nanomalzeme Tasarımı

Makine öğrenmesi ve yapay zekâ algoritmaları, nanomalzemelerin elektronik yapılarını ve enerji dönüşüm performanslarını öngörmeye olanak tanıyarak deneysel süreçleri hızlandırmaktadır (Butler et al., 2018). Bu yaklaşım, nanoteknolojiyi veri temelli bir tasarım paradigmasına dönüştürmektedir.

## 6.3 Endüstriyel Ölçeklenebilirlik

Nanoteknoloji tabanlı enerji çözümlerinin yaygınlaşmasında teknoloji hazırlık seviyesi (TRL) kritik bir ölçüt hâline gelmiştir. Büyük ölçekli üretime yönelik roll-to-roll teknikleri ve düşük sıcaklıklı sentez yöntemleri, ticarileşme sürecini hızlandıran başlıca stratejiler arasında yer almaktadır (Polman et al., 2016).

## 6.4. Sürdürülebilirlik ve Döngüsel Ekonomi

Nanomalzemelerin yaşam döngüsü analizi, enerji sistemlerinin çevresel etkilerinin değerlendirilmesi açısından zorunlu hâle gelmiştir. Döngüsel ekonomi yaklaşımı, nanoteknoloji destekli enerji sistemlerinde malzeme kullanımını optimize etmeyi ve kritik elementlere bağımlılığı azaltmayı hedeflemektedir (Karn et al., 2009).

## 7. Zorluklar, Riskler ve Sürdürülebilirlik Değerlendirmeleri

Nanoteknoloji tabanlı enerji sistemlerinin yaygın uygulanabilirliği; teknik, ekonomik ve çevresel zorluklarla sınırlanmaktadır. Nanomalzemelerin yüksek maliyetli üretimi, uzun dönemli stabilite sorunları ve nadir elementlere olan bağımlılık, bu alandaki temel risk faktörleri arasında yer almaktadır (Polman et al., 2016; Larcher & Tarascon, 2015).

Buna ek olarak, nanomalzemelerin çevresel ve biyolojik etkileri, güvenli kullanım ve bertaraf süreçlerinin dikkatle planlanmasını gerektirmektedir. Bu nedenle nanoteknoloji, enerji üretiminde yalnızca performans artırıcı bir araç değil; sürdürülebilirlik ilkeleriyle birlikte ele alınması gereken bütüncül bir teknoloji olarak değerlendirilmelidir.

### 7.1. Çevresel ve Sağlık Riskleri

Nanomalzemelerin çevresel ve biyolojik etkileri, nanoteknolojinin sürdürülebilir enerji sistemlerinde kullanımına ilişkin en kritik ve tartışmalı başlıklardan biridir. Nano-ölçekli parçacıkların yüksek özgül yüzey alanı, artan kimyasal reaktivite ve biyolojik bariyerleri aşabilme potansiyeli; insan sağlığı ve ekosistemler üzerinde kısa ve uzun vadede öngörülemeyen etkilere yol açabilmektedir (Karn et al., 2009).

Enerji üretim sistemlerinde kullanılan nanomalzemelerin; üretim, kullanım ve bertaraf aşamalarında çevreye kontrolsüz biçimde salınma riski bulunmaktadır. Bu nedenle yaşam döngüsü analizi (Life Cycle Assessment, LCA), nanoteknoloji tabanlı enerji sistemlerinin çevresel etkilerinin nicel olarak değerlendirilmesinde temel bir araç hâline gelmiştir. Güncel çalışmalar, bazı nanomalzemelerin üretim süreçlerinde geleneksel malzemelere kıyasla daha yüksek enerji tüketimi ve karbon ayak izi oluşturabildiğini ortaya koymaktadır (Arvidsson et al., 2018).

Bu bulgular, nanoteknolojinin enerji alanında sorumlu ve sürdürülebilir biçimde kullanılabilmesi için “güvenli tasarım” (safe-by-design) yaklaşımlarının geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Güvenli tasarım stratejileri; malzeme sentezinden sistem entegrasyonuna kadar tüm aşamalarda toksisite, çevresel yayılım ve geri dönüşüm kriterlerinin birlikte değerlendirilmesini hedeflemektedir.

## 7.2. Sürdürülebilirlik ve Düzenleyici Çerçeve

Nanoteknolojinin enerji üretimindeki uzun vadeli başarısı, yalnızca teknik performans kazanımlarına değil; aynı zamanda sürdürülebilirlik ilkeleri ve düzenleyici çerçevelerle uyumuna da bağlıdır. Uluslararası standart kuruluşları ve düzenleyici otoriteler, nanomalzemelerin üretimi ve kullanımı için çevresel, sağlık ve güvenlik (Environmental, Health and Safety – EHS) kriterlerini giderek daha fazla ön plana çıkarmaktadır.

Sürdürülebilir nanoteknoloji yaklaşımı; çevre dostu sentez yöntemleri, düşük toksisiteli ve geri dönüştürülebilir malzemelerin geliştirilmesi ile döngüsel ekonomi prensiplerinin enerji sistemlerine entegrasyonunu amaçlamaktadır. Bu bağlamda biyobazlı nanomalzemeler, yeşil kimya temelli üretim süreçleri ve kritik elementlere alternatif düşük maliyetli malzeme tasarımları, gelecekte enerji alanındaki nanoteknoloji araştırmalarının temel odak noktaları arasında yer alacaktır.

## 8. SONUÇ

Bu çalışma, nanoteknolojik sistemlerin enerji üretimindeki rolünü; temel fiziksel ve kimyasal mekanizmalardan uygulamalı sistemlere, ortaya çıkan eğilimlerden sürdürülebilirlik değerlendirmelerine kadar bütüncül bir bakış açısıyla ele almıştır. Elde edilen değerlendirmeler, nanoteknolojinin enerji üretiminde yalnızca performansı artıran bir araç değil; enerji sistemlerini yapısal olarak dönüştüren stratejik bir teknoloji olduğunu açıkça göstermektedir.

Nanomalzemelerin sunduğu yüksek yüzey alanı, ayarlanabilir elektronik yapı ve çok işlevlilik özellikleri; güneş enerjisi sistemleri, hidrojen üretimi, yakıt hücreleri ve hibrit üretim-depolama platformlarında önemli verimlilik kazanımları sağlamaktadır. Özellikle nano-ölçekli arayüz mühendisliği ve çok fonksiyonlu hibrit sistem tasarımları, enerji dönüşüm zincirinde meydana gelen kayıpların azaltılmasında belirleyici rol oynamaktadır.

Gelecek perspektifinde, nanoteknolojinin enerji alanındaki gelişiminin üç temel eksen etrafında şekilleneceği öngörülmektedir:

- (i) dijitalleşme ve yapay zekâ destekli malzeme tasarımı,
- (ii) endüstriyel ölçeklenebilirlik ve maliyet etkin üretim yaklaşımları,
- (iii) çevresel sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi ilkeleri.

Bu eksenlerin birlikte ele alınması, nanoteknoloji tabanlı enerji sistemlerinin laboratuvar ölçeğinden ticarî uygulamalara geçişini hızlandıracaktır. Sonuç olarak nanoteknoloji; küresel enerji dönüşümünde yalnızca tamamlayıcı bir unsur değil, sürdürülebilir, esnek ve akıllı enerji altyapılarının temel yapı taşlarından biri olma potansiyeline sahiptir.

## KAYNAKLAR

- Chu, S., & Majumdar, A. (2012). Opportunities and challenges for a sustainable energy future. *Nature*, 488(7411), 294–303. doi:10.1038/nature11475
- Dresselhaus, M. S., Chen, G., Tang, M. Y., Yang, R., Lee, H., Wang, D., Ren, Z., Fleurial, J. P., & Gogna, P. (2007). New directions for low-dimensional thermoelectric materials. *Advanced Materials*, 19(8), 1043–1053. doi:10.1002/adma.200600527
- Åberg, M., & Henning, D. (2011). Optimisation of a Swedish district heating system with reduced heat demand due to energy efficiency measures in residential buildings. *Energy Policy*, 39(12), 7839-7852. IPCC. (2014). *Climate change 2014: Mitigation of climate change*. Cambridge University Press.
- Poizot, P., & Dolhem, F. (2011). Clean energy new deal for a sustainable world: From non-CO<sub>2</sub> generating energy sources to greener electrochemical storage devices. *Energy & Environmental Science*, 4(6), 2003–2019. doi:10.1039/C0EE00731E
- Polman, A., Knight, M., Garnett, E. C., Ehrler, B., & Sinke, W. C. (2016). Photovoltaic materials: Present efficiencies and future challenges. *Science*, 352(6283), aad4424. doi:10.1126/science.aad4424
- Smil, V. (2017). *Energy and civilization: A history*. MIT Press.
- Turner, J. A. (2004). Sustainable hydrogen production. *Science*, 305(5686), 972–974. doi:10.1126/science.1103197
- Was, G. S. (2017). *Fundamentals of radiation materials science: Metals and alloys*. Springer.
- Auzel, F. (2004). Upconversion and anti-Stokes processes with f and d ions in solids. *Chemical Reviews*, 104(1), 139–174. doi:10.1021/cr020357g
- Bhushan, B. (2017). *Springer handbook of nanotechnology* (4th ed.). Springer.
- Cao, G., & Wang, Y. (2011). *Nanostructures and nanomaterials: Synthesis, properties, and applications* (2nd ed.). World Scientific.
- Dai, H. (2002). Carbon nanotubes: Opportunities and challenges. *Surface Science*, 500(1–3), 218–241. doi:10.1016/S0039-6028(01)01558-8.
- Geim, A. K., & Novoselov, K. S. (2007). The rise of graphene. *Nature Materials*, 6(3), 183–191. doi:10.1038/nmat1849
- Nozik, A. J. (2002). Quantum dot solar cells. *Physica E*, 14(1–2), 115–120. doi:10.1016/S1386-9477(02)00374-0
- Roduner, E. (2006). Size matters: Why nanomaterials are different. *Chemical Society Reviews*, 35(7), 583–592. doi:10.1039/B502142C
- Atwater, H. A., & Polman, A. (2010). Plasmonics for improved photovoltaic devices. *Nature Materials*, 9(3), 205–213.
- Bhatt, M. D., & Lee, J. S. (2017). Nanostructured materials for solar hydrogen production. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(3), 1066–1084.
- Green, M. A. (2016). *Third generation photovoltaics: Advanced solar energy conversion*. Springer.



- Kment, Š., Schmuki, P., Hubička, Z., Machala, L., & Gregor, M. (2020). Photoelectrochemical water splitting using semiconductor nanostructures. *Chemical Society Reviews*, 49(11), 3554–3592.
- Lewis, N. S., & Nocera, D. G. (2006). Powering the planet: Chemical challenges in solar energy utilization. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(43), 15729–15735.
- Park, N. G., Grätzel, M., & Miyasaka, T. (2016). *Organic–inorganic halide perovskite photovoltaics*. Springer.
- Was, G. S. (2017). *Fundamentals of radiation materials science*. Springer.
- Walter, M. G., Warren, E. L., McKone, J. R., Boettcher, S. W., Mi, Q., Santori, E. A., & Lewis, N. S. (2010). Solar water splitting cells. *Chemical Reviews*, 110(11), 6446–6473.
- Arico, A. S., Bruce, P., Scrosati, B., Tarascon, J. M., & Van Schalkwijk, W. (2005). Nanostructured materials for advanced energy conversion and storage devices. *Nature Materials*, 4, 366–377.
- Armaroli, N., & Balzani, V. (2011). Towards an electricity-powered world. *Energy & Environmental Science*, 4, 3193–3222.
- Atwater, H. A., & Polman, A. (2010). Plasmonics for improved photovoltaic devices. *Nature Materials*, 9, 205–213.
- Chen, X., Li, C., Grätzel, M., Kostecki, R., & Mao, S. S. (2020). Nanomaterials for renewable energy production and storage. *Chemical Society Reviews*, 41, 7909–7937.
- Dunn, B., Kamath, H., & Tarascon, J. M. (2011). Electrical energy storage for the grid. *Science*, 334, 928–935.
- Huber, G. W., Iborra, S., & Corma, A. (2006). Synthesis of transportation fuels from biomass. *Chemical Reviews*, 106, 4044–4098.
- Larminie, J., & Dicks, A. (2003). *Fuel cell systems explained*. Wiley.
- Lewis, N. S., & Nocera, D. G. (2006). Powering the planet. *PNAS*, 103, 15729–15735.
- Bruce, P. G., Freunberger, S. A., Hardwick, L. J., & Tarascon, J. M. (2012). Li–O<sub>2</sub> and Li–S batteries with high energy storage. *Nature Materials*, 11(1), 19–29. <https://doi.org/10.1038/nmat3191>
- Butler, K. T., Davies, D. W., Cartwright, H., Isayev, O., & Walsh, A. (2018). Machine learning for molecular and materials science. *Nature*, 559(7715), 547–555. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0337-2>
- Dunn, B., Kamath, H., & Tarascon, J. M. (2011). Electrical energy storage for the grid: A battery of choices. *Science*, 334(6058), 928–935. <https://doi.org/10.1126/science.1212741>
- European Commission. (2017). *Technology readiness levels (TRL): Extract from Part 19 – Commission Decision C(2014)4995*. Brussels: European Union.
- Karn, B., Kuiken, T., & Otto, M. (2009). Nanotechnology and in situ remediation: A review of the benefits and potential risks. *Environmental Health Perspectives*, 117(12), 1823–1831. <https://doi.org/10.1289/ehp.0900793>

- Larcher, D., & Tarascon, J. M. (2015). Towards greener and more sustainable batteries for electrical energy storage. *Nature Chemistry*, 7(1), 19–29. <https://doi.org/10.1038/nchem.2085>
- Miller, J. R., & Simon, P. (2008). Electrochemical capacitors for energy management. *Science*, 321(5889), 651–652. <https://doi.org/10.1126/science.1158736>
- Polman, A., Knight, M., Garnett, E. C., Ehrler, B., & Sinke, W. C. (2016). Photovoltaic materials: Present efficiencies and future challenges. *Science*, 352(6283), aad4424. <https://doi.org/10.1126/science.aad4424>
- Schmidt, J., Marques, M. R. G., Botti, S., & Marques, M. A. L. (2019). Recent advances and applications of machine learning in solid-state materials science. *npj Computational Materials*, 5(1), 83. <https://doi.org/10.1038/s41524-019-0221-0>
- Simon, P., & Gogotsi, Y. (2008). Materials for electrochemical capacitors. *Nature Materials*, 7(11), 845–854. <https://doi.org/10.1038/nmat2297>
- Wang, X., & Wang, Z. L. (2019). Triboelectric nanogenerators as new energy technology for self-powered systems and as active mechanical and chemical sensors. *ACS Nano*, 13(12), 14153–14172. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b08698>
- Wang, Z. L., Chen, J., & Lin, L. (2014). Progress in triboelectric nanogenerators as a new energy technology and self-powered sensors. *Energy & Environmental Science*, 8(8), 2250–2282. <https://doi.org/10.1039/C5EE01532D>
- Yu, M., Lin, D., Feng, H., Zeng, Y., Tong, Y., & Lu, X. (2016). Boosting the energy density of carbon-based supercapacitors by designing hierarchical porous structures. *Advanced Materials*, 29(15), 1607135. <https://doi.org/10.1002/adma.201607135>
- Zhang, H., & Zhao, X. (2009). Carbon-based materials as supercapacitor electrodes. *Chemical Society Reviews*, 38(9), 2520–2531. <https://doi.org/10.1039/B813846J>
- Zhang, Y., Li, G., & Chen, X. (2020). Emerging nanomaterials for sustainable energy applications. *Advanced Energy Materials*, 10(16), 1903978. <https://doi.org/10.1002/aenm.201903978>
- Zhong, W., Xu, L., Yang, Y., & Wang, Z. L. (2021). Triboelectric nanogenerators: Fundamentals, progress, and perspectives. *ACS Nano*, 15(10), 16381–16415. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c06595>
- Arvidsson, R., Molander, S., Sandén, B. A., & Hassellöv, M. (2018). Challenges in exposure modeling of nanomaterials in life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 176, 844–852. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.009>
- Karn, B., Kuiken, T., & Otto, M. (2009). *Nanotechnology and in situ remediation: A review of the benefits and potential risks*. *Environmental Health Perspectives*, 117(12), 1823–1831. <https://doi.org/10.1289/ehp.0900793>

//

# Bölüm 17

ÜRETİM YÜRÜTME SİSTEMLERİ (MES) VE  
ENDÜSTRİ 4.0: TEKSTİL VE HAZIR GİYİM  
SEKTÖRÜNDE DİJİTAL DÖNÜŞÜM

*ALİME ASLI İLLEEZ<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Ege Üniversitesi, Emel Akın Meslek Yüksekokul, Orcid: 0000-0001-9760-246X

## Giriş

Günümüz pazar koşullarında rekabet arttığı için üretim süreçlerinde sürekli iyileşme ve esneklik sağlanması gerekmektedir. Üretim yapılan bir firmanın içerisinde; üretim tesislerinin planlanması, geliştirilmesi ve bakımı; üretim hedeflerinin belirlenmesi; üretim malzemelerinin tedariki, depolanması ve bulunabilirliği; bitmiş ürünün üretilmesi için gereken ekipman, tesis, malzeme ve iş gücünün planlanması...vb durumların anlık kararlar ile yönetilmesi gerekmektedir. Teknolojinin gelişmesi ile birlikte işletmelerden beklentilerin de artması ile bu tip ihtiyaçlar için dijital sistemlerin gereklilikleri daha da artmaktadır.

Dijital üretim, modern teknolojileri kullanarak geleneksel üretim süreçlerini devrimsel bir şekilde dönüştüren son teknoloji ürünü bir yaklaşımdır. (Das ve ark., 2025). Endüstri 4.0, üretkenliği, kaliteyi ve esnekliği artırmak amacıyla birbirleriyle ilişkili dijital teknolojilerin kademeli olarak uygulanmasını hedefleyen teknolojik bir paradigmadır (Enrique ve ark., 2022). Bu yolculuk, fabrika zemininde olayların gerçek zamanlı takibini ve bu bilgilerin karar verme süreçlerine entegre edilmesini sağlayan görünürlük yeteneklerinin artırılmasıyla başlamaktadır (Dalenogare ve ark., 2018).

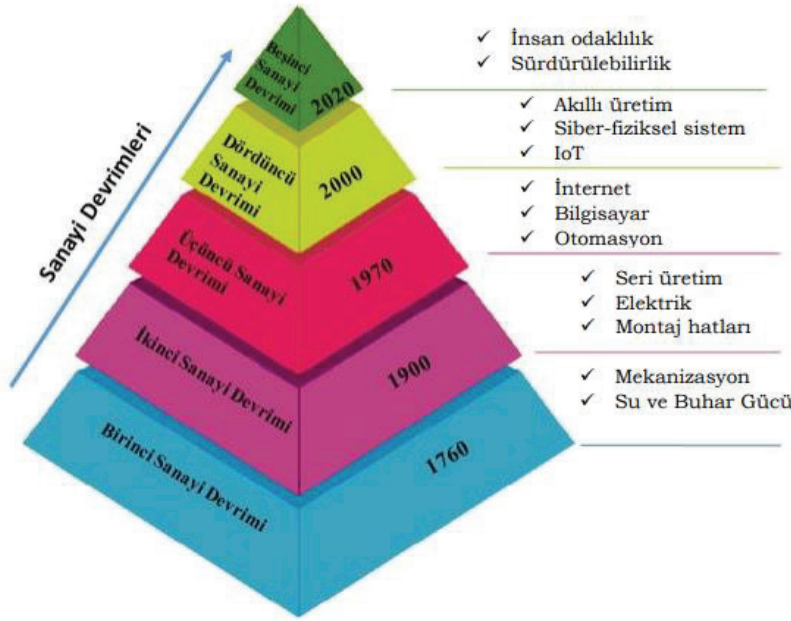
Üretim Yürütme Sistemleri (MES), bu dönüşümün merkezinde yer alarak, üretim operasyonları ile kurumsal düzeydeki iş sistemleri (ERP) arasında hayati bir köprü görevi görmektedir (Filipov ve Christova, 2008). MES, üretim süreçlerinin gerçek zamanlı izlenmesini, kontrol edilmesini ve veri yönetimini sağlayan bilgisayar tabanlı bir yönetim sistemidir. Özellikle tekstil ve hazır giyim gibi iş gücü yoğun sektörlerde MES, ham madde takibinden bitmiş ürünün piyasaya sürülmesine kadar üretimin her yönünü yönetmek için tasarlanmıştır (Das ve ark., 2025). Akıllı fabrikalarda MES, operasyonel teknolojileri (OT) bilgi teknolojileri (BT) ile birleştiren bir "beyin" işlevi görerek, değişken pazar taleplerine hızlı yanıt verilmesini sağlamaktadır (Benitez ve ark., 2023).

## MES ve Endüstri 4.0'ın Tarihçesi

Üretim yöntemleri ve yönetim sistemleri, tarihsel süreç içerisinde teknolojik devrimlerle paralel olarak evrimleşmiştir (Ko ve ark., 2022). Sanayi devrimlerini kısaca özetleyecek olursak şu aşamalardan oluştuğunu görmekteyiz:

- **Endüstri 1.0:** 1760'dan 1840'a kadar süren buhar gücünün kullanımı ve üretimin makineleşmesiyle başlayan süreci ifade etmektedir. Buhar makinesi ve mekanik dokuma tezgahlarının ortaya çıkışıyla başlamıştır (Rondeau ve Litteral, 2001).
- **Endüstri 2.0:** 19. yüzyılın sonunda elektrik enerjisinin fabrikalara uygulanması ve montaj hatlarının geliştirilmesiyle kitlesel üretim dönemi açılmıştır (Skinner, 1984).
- **Endüstri 3.0:** 20. yüzyılın başlarında BİT (Bilgi ve İletişim Teknolojileri) gelişimi ve bilgisayar kontrolü aracılığıyla otomasyon sistemlerinin devreye girmesiyle karakterize edilebilmiştir (Womack, 1990).
- **Endüstri 4.0:** 2011 yılında Hannover Ticaret Fuarı'nda resmi olarak duyurulmuştur. Nesnelerin İnterneti (IoT), Siber-Fiziksel Sistemler (CPS) ve bulut bilişim gibi yıkıcı teknolojilerin üretim ortamına girmesini temsil etmiştir (Kagermann, 2013).
- **Endüstri 5.0:** Günümüzde Avrupa'da tartışılmaya başlanan bu kavram, insan merkezilik, sürdürülebilirlik ve dayanıklılık değerlerine odaklanmaktadır (Kabilova, ve Bazarbaeva, 2025).

### Şekil 1. Sanayi Devrimlerinin Gelişimi



#### Kılıç, 2023

Endüstri 4.0 kapsamında işletmelerde MES (Manufacturing Execution System – Üretim Yürütme Sistemleri) ve ERP (Kurumsal Kaynak Planlama) gibi yazılımların kullanılması, üretim sürecinin hızlanmasını ve verimlilik artışını sağlarken, yöneticilerin de proaktif olarak uygun maliyetli ve kaliteli ürünler teslim edebilmesi sağlanabilmektedir (Kasa ve Aslan, 2020). MES kavramı, üretim sahasındaki faaliyetlerin çevrimiçi yönetimi amacıyla 1970'lerde doğmuştur. MES, üreticilerin kurum genelinde üretimi daha etkin bir şekilde izlemesine, gerçek kısıtlamaları olan üretim programlarını optimize etmesine, hem süreç hem de bitmiş ürün perspektifinden kaliteyi iyileştirmesine olanak tanımaktadır (Bhasin, 2015).

1990'ların başında Üretim Yürütme Sistemleri Derneği (MESA) kurulmuş ve bir sistemin MES olarak sınıflandırılması için gerekli olan 11 temel işlev tanımlanmıştır (Tabim ve ark., 2024). Bu işlevler arasında kaynak tahsisi, operasyon çizelgeleme, veri toplama ve kalite yönetimi yer almaktadır. 2000'li yıllardan sonra MES, Endüstri 4.0'ın gelişimiyle birlikte akıllı fabrikaların temel taşı haline gelmiş; standart MES işlevleri yapay zeka (AI) ve IoT ile entegre edilerek daha esnek ve ölçeklenebilir yapılara bürünmüştür (Arsic ve ark., 2025).

Üretim Yürütme Sistemleri (MES) işletmelerin olgunluk seviyelerine göre üç temel konfigürasyonda uygulanabilmektedir. Kaynaklara göre bu konfigürasyonlar şu şekildedir (Tabim ve ark., 2024):

#### Yerel Görünürlük (Local Visibility)

Bu konfigürasyon, genellikle Endüstri 4.0 yolculuğuna yeni başlayan firmalar tarafından tercih edilmektedir. Sistemin temel odak noktası, tüm fabrika yerine belirli bir üretim hattı veya departmanda görünürlük sağlanmasıdır. Bu konfigürasyon işlevsellik, teknolojiler ve iş birliği modeli yönünden incelendiğinde;

- **İşlevsellik:** Veri toplama, üretim izleme (OEE - Toplam Ekipman Etkinliği), ürün takibi veya kalite yönetimi gibi spesifik modülleri içermektedir.

- **Teknolojiler:** Gerçek zamanlı veri toplama için tak-çalıştır IoT çözümleri ve verilerin görselleştirildiği bulut tabanlı basit analitik modüller kullanılmaktadır.

- **İş Birliği Modeli:** Alıcı ve sağlayıcı arasındaki ilişki "Kara Kutu" (Black Box) düzeyindedir; yani sağlayıcı standart bir çözüm sunar ve basit bir bilgi transferi (knowledge transfer) süreci yeterli olmaktadır.

### ***Tek Yönlü Entegrasyon (One-way Integration)***

Bu konfigürasyon, işletmenin genelinde fabrika görünürlüğü sağlamayı hedefler ve sistemlerin dikey olarak entegre edilmesini gerektirmektedir. Bu konfigürasyon yine işlevsellik, teknolojiler ve iş birliği modeli yönünden incelendiğinde;

- **İşlevsellik:** IoT sensörlerinden gelen veriler MES üzerinden ERP (Kurumsal Kaynak Planlama) sistemine aktarılır. Bu tek yönlü bilgi akışı, üretim hattı göstergelerinin idari bilgilerle birleştirilmesine olanak tanımaktadır. Böylece yöneticiler, gerçek ekipman verimliliğine veya ham madde stok durumuna göre üretim siparişlerini yeniden düzenleyebilmektedir.

- **Teknolojiler:** IoT sistemlerine ek olarak, farklı süreçlerdeki verileri birleştiren bulut sistemleri ve temel büyük veri analitiği araçları kullanılabilirlerdir.

- **İş Birliği Modeli:** Bu yapı "Beyaz Kutu" (White Box) modeline dayanır; çözüm alıcının spesifik gereksinimlerine göre özelleştirilir ve genellikle bir danışman aracılığıyla bilgi çevirisi sürecini gerektirebilmektedir.

### ***Çift Yönlü Entegrasyon (Two-way Integration)***

En gelişmiş konfigürasyon olan bu yapı, Dijital İkiz (Digital Twin) ve otonom süreçlerin hayata geçirilmesine odaklanmıştır. Bu konfigürasyon yine işlevsellik, teknolojiler ve iş birliği modeli yönünden incelendiğinde;

- **İşlevsellik:** MES, işletmenin "beyni" gibi çalışarak üretim sahası ile kurumsal seviye (satın alma, İK, tasarım vb.) arasında çift yönlü ve eş zamanlı bir veri akışı sağlayabilmektedir. Bilgi sadece yukarı (stratejik seviyeye) akmakla kalmaz, stratejik kararlar ve planlama verileri de gerçek zamanlı olarak üretim sahasındaki makineleri yönlendirilebilmektedir.

- **Teknolojiler:** Yapay zeka destekli otonom karar verme mekanizmaları, gelişmiş büyük veri analitiği, bulut bilişim ve süreç adaptasyonu sağlayan dijital ikiz simülasyonları bu konfigürasyonun merkezindedir.

- **İş Birliği Modeli:** "Gri Kutu" (Grey Box) modelidir; alıcı ve sağlayıcı çözümü birlikte geliştirilmektedir. Bu süreç, her iki tarafın da birbirinin alanına derinlemesine nüfuz ettiği yüksek karmaşıklıkta bir bilgi dönüşümü dinamiğini zorunlu kılmaktadır.

Yukarıda bahsedilen MES konfigürasyonları bir trafik yönetim sistemine benzetilebilmektedir. Yerel Görünürlük, sadece tek bir kavşaktaki kameranın ne olduğunu görebilmesi iken Tek Yönlü Entegrasyon, bu kameradan gelen verinin şehir trafik merkezine gidip oradaki haritayı güncelleyebilmesidir. Çift Yönlü Entegrasyon ise trafik merkezindeki yapay zekanın yoğunluğu fark edip, kameranın altındaki akıllı trafik ışıklarının sürelerini ve çevredeki araçların rotalarını o anda otomatik olarak değiştirebilmesidir.

## Literatürdeki MES Uygulama Örnekleri

MES sistemlerinin tekstil ve hazır giyim sektörlerindeki uygulamaları, operasyonel mükemmelliğin anahtarı haline gelmektedir. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmektedir.

Das ve arkadaşları (2025) tarafından Centurion Teknoloji ve Yönetim Üniversitesi'nde gerçekleştirilen bir vaka çalışmasında, hazır giyim biriminde Dassault System tarafından sunulan "Apriso" MES yazılımı uygulanmıştır. Bu sistemde, dikiş makinelerine yerleştirilen 32-bit SoC cihazları ve RFID okuyucuları aracılığıyla "İnsan, Makine ve Malzeme" gerçek zamanlı olarak takip edilmektedir. Operatör verimliliği ve makinelerin çalışma süreleri bulut tabanlı bir gösterge paneli (dashboard) üzerinden izlenebilmektedir ( Das ve ark., 2025).

Kore moda endüstrisinde Ko ve arkadaşları, kişiselleştirilmiş spor giyim ürünleri için "sipariş-tasarım-üretim-teslimat" değer zincirini destekleyen bulut tabanlı bir işbirlikçi MES sistemi geliştirmiştir. Bu sistem, tasarım, kumaş tedariki, baskı ve dikiş yapan 11 farklı şirket arasındaki iş birliğini koordine etmektedir. Android tabanlı mobil sistemler sayesinde işçiler iş talimatlarını dijital olarak doğrulamakta ve ilerleme durumunu anlık olarak sisteme girilebilmektedir (Ko ve ark., 2022).

Yuan ve arkadaşları tarafından üretim sahasında operatörlerin MES ile etkileşimini kolaylaştırmak için Büyük Dil Modelleri (LLM) tabanlı "Chat with MES" (CWM) sistemi geliştirilmiştir. Geleneksel grafik kullanıcı arayüzlerinin (GUI) aksine bu sistem, operatörlerin doğal dil kullanarak veritabanı sorguları yapmasına, görev atamasına ve üretim raporları almasına olanak tanımaktadır. Simüle edilmiş bir hazır giyim MES'inde yapılan testler, sistemin %80 yürütme doğruluğuna ulaştığını göstermektedir (Yuan ve ark., 2025).

## Avantajlar ve Dezavantajlar

MES ve Endüstri 4.0 teknolojilerinin uygulanması önemli getiriler sunsa da, beraberinde bazı zorluklar da getirmektedir.

### 1. Avantajlar

- **Verimlilik ve Maliyet Tasarrufu:** MES sistemlerinin segisel bir arayüzle uygulanması, üretim verimliliğini ve kalite kontrolü artırırken, malzeme ve finansal maliyetlerde %16, üretim süresinde ise %28'e varan azalmalar sağlamaktadır (Kabilova ve Bazarbaeva, 2025).

- **OEE (Toplam Ekipman Etkinliği) İyileştirmesi:** Dijital hat dengeleme algoritmaları ve gerçek zamanlı izleme cihazlarının entegrasyonu, hazır giyim sektöründe OEE değerlerini %40-60 seviyelerinden %75 sürdürülebilir hedefine çıkarabilmektedir (Koç ve Eryürük, 2025).

- **Görünürlük ve Karar Destek:** IoT tabanlı Proses İleme Cihazları (Process Monitoring Devices-PMD), makine duruş süreleri ve operatör performansı hakkında gerçek zamanlı içgörüler sunarak proaktif kararlar alınmasını sağlamaktadır (Huang ve Sahari, 2025).

- **Sürdürülebilirlik:** Dijitalleşme, kumaş kusurlarının erken tespiti ve üretim hatalarının azaltılması yoluyla tekstil atıklarını minimize ederek çevresel etki düşürülebilmektedir (Machado ve ark., 2025).

## 2. Dezavantajlar ve Zorluklar

• **Yüksek İlk Yatırım Maliyetleri:** Özellikle KOBİ'ler için donanım, yazılım ve BT altyapı güncellemeleri finansal bir engel teşkil etmektedir (Karabegovic, 2025).

• **Veri Gizliliği ve Güvenlik:** Lüks moda sektörü gibi alanlarda, tasarım ve üretim verilerinin kurum içinde tutulması (on-premises) gerekliliği, dış bulut servislerinin kullanımını zorlaştırmaktadır (De Martino, 2025).

• **Teknik Entegrasyon Sorunları:** Mevcut ERP/WMS sistemleri ile yeni MES yazılımları arasındaki uyumsuzluklar ve eski makinelerin dijital sistemlere bağlanması karmaşık süreçler meydana getirmektedir (De Martino, 2025).

• **İnsan Faktörü ve Direnç:** Çalışanların yeni teknolojilere adaptasyonu, beceri eksiklikleri ve iş güvencesi kaygıları dönüşümün önünde çok büyük bir engel oluşturabilmektedir (Koç ve Eryürük, 2025).

## Sonuç

Üretim Yürütme Sistemleri, Endüstri 4.0 dijital dönüşüm yolculuğunun "giriş kapısı" ve akıllı üretimin "beyni" olarak kabul edilmektedir (Tabim ve ark., 2021). Geleneksel ve iş gücü yoğun tekstil sektöründe bile MES, gerçek zamanlı veri akışını sağlayarak üretim süreçlerini optimize etmekte ve rekabet gücünü artırmakta önemli bir rol oynamaktadır. Hazır giyim KOBİ'leri için özel olarak tasarlanan Dijitalleşme Yol Haritası (DFGM) gibi çerçeveler, bu işletmelerin mevcut durumlarını değerlendirmelerine ve adım adım dijitalleşmelerine yardımcı olmaktadır (Molgazhdarova, 2025).

Gelecekte, MES sistemlerinin daha uyarlanabilir, akıllı ve kullanıcı odaklı hale gelmesi; yapay zeka, makine öğrenimi ve Dijital İkiz (Digital Twin) teknolojileriyle tam entegrasyonu beklenmektedir. Başarılı bir dijital dönüşüm için sadece teknolojik yatırım yeterli değildir; üst yönetim desteği, sürekli çalışan eğitimi ve şirket kültürünün bu değişime uyarlanması kritik başarı faktörleri arasındadır. Sonuç olarak MES, sanayi kuruluşlarının karmaşık pazar taleplerine çevik ve sürdürülebilir bir şekilde yanıt vermesini sağlayan stratejik bir araç olarak çalışma hayatında yerini alacaktır.



## Kaynakça

- Arsic A., Lukovic M., Ducic N., (2025), MESWARM: A Modular and AI-Driven Manufacturing Execution System for Industry 4.0, International Scientific Journal "Industry 4.0", Vol 10, Issue 2, pp 47-52
- Bhasin S., (2015), Lean Management Beyond Manufacturing: A Holistic Approach Cham: Springer International Publishing.
- Dalenogare, L. S., Benitez, G. B., Ayala, N. F., & Frank, A. G. (2018). The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal of Production Economics*, 383–394. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.019>
- Das, S. S., Jena, S., Nandini, G., Patjoshi, P. K., & Nayak, B. B. (2025). Optimizing apparel production: A case study on implementing a manufacturing execution system (MES) for improved efficiency and quality. *AIP Conference Proceedings*, 3157, 130015.
- De Martino, G. (2025). Toward a non-invasive architecture supporting traditional textile manufacturing systems in their transition to Industry 4.0. *22nd IEEE International Conference on Software Architecture (ICSA 2025)*.
- Filipov V., Christova N., (2008), A Solution for Integrated Manufacturing Operation Management, Conference Paper, DOI: 10.1109 /CIMCA.2008.189 · Source: DBLP, January 2008.
- Huang Z., Sahari F., (2025), Implications of fit customization in the apparel industry: an analytical study, *Research Journal of Textile and Apparel*, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/RJTA-04-2025-0078>1560-6074
- Kabilova, D. S., & Bazarbaeva, G. G. (2025). Formation of the MES software interface for the sewing production management system. *AIP Conference Proceedings*, 3304, 030039.
- Karabegović, I. (2025). Analysis of the impact of mobile robots on the efficiency of warehousing and transport processes in modern textile manufacturing. *Tekstilna Industrija*, 73(2), 49-60.
- Kasa H., Arslan G., (2020), Endüstri 4.0 Kapsamında Teorik Bir Analiz: Türkiye Örneği, *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*, Ekim/October(2020) - Cilt/Volume:19 - Sayı/Issue:76
- Ko, M., Lee, C., & Cho, Y. (2022). Design and implementation of cloud-based collaborative manufacturing execution system in the Korean fashion industry. *Applied Sciences*, 12, 9381.
- Koç, B., & Eryürük, S. H. (2025). Achieving sustainable overall equipment effectiveness (OEE) in apparel industry with lean and digital integration. *Engineering Reports*.
- Machado,R.;Barros, L.A.M.; Vieira, V.; Silva, F.D.d.; Costa, H.; Carvalho, V., 2025, Textile Defect Detection Using Artificial Intelligence and Computer Vision—A Preliminary Deep Learning Approach. *Electronics*, 14, 3692. <https://doi.org/10.3390/electronics14183692>
- Molgazhdarova, Z. (2025). *Digitalisation framework for garment manufacturing SMEs to adopt Industry 4.0 technologies*. Loughborough University.
- Rondeau, P.J.; Litteral, L.A. (2001), The evolution of manufacturing planning and control systems: From reorder point to enterprise resource planning, *Production Inventory Management*. J, 34,1–7.
- Skinner, W., (1984), *The Taming of Lions: How Manufacturing Leadership Evolved, 1780–1984*; Division of Research, Harvard Business School: Boston, MA, USA
- Tabim, V. M., Ayala, N. F., Marodin, G. A., Benitez, G. B., & Frank, A. G. (2024). Implementing manufacturing execution systems (MES) for Industry 4.0: Overcoming buyer-provider information asymmetries through knowledge sharing dynamics. *Computers & Industrial Engineering*, 196, 110483.
- Yuan, Z., Li, M., Liu, C., Han, F., Huang, H., & Dai, H. N. (2025). Chat with MES: LLM-driven user interface for manipulating garment manufacturing system through natural language. *Journal of Manufacturing Systems*, 80, 1093-1107.
- Womack,J.P., (1990) Jones, D.T.; Roos, D. *The Machine that Changed the World*; Harper Perennial/Harper Collins: New York, NY, USA



# Bölüm 18

**POLİMER KOMPOZİTLERİN EMPEDANS  
DEĞERİ ÜZERİNDE FREKANS, VOLTAJ VE  
GRAFENİN ETKİSİNİN MERKEZİ KOMPOZİT  
TASARIMI İLE İNCELENMESİ**

*Güzin PIHTILI YILDIZ<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Doç. Dr. 0000-0003-2261-6810, Munzur Üniversitesi, TMYO, Kimya ve  
Kimyasal İşleme Teknolojileri Bölümü, Tunceli, Türkiye

## 1. GİRİŞ

Cevap Yüzey Yöntemi, (CYY), çok faktörlü testleri planlamak ve çok değişkenli denklemleri çözmek için faktöriyel planları ve regresyon çalışmalarını içeren yaygın olarak kullanılan bir istatistiksel yöntemdir (Tepe ve Dursun, 2021). CYY, ortam koşullarını optimize etme, verimliliği artırma ve maliyetleri düşürme açısından büyük avantajlar sağlar (Myers ve Montgomery, 2002). Bu yöntemde, matematiksel ve istatistiksel veriler birlikte değerlendirilir ve optimum deneysel koşullar belirlenir (Calban ve ark., 2006; Mohapatra ve ark., 2009). Bu yöntem, enzim üretiminin optimizasyonu, gıda işleme ve biyokimya ve kimya mühendisliği alanlarında polimerlerin çeşitli parametrelerinin belirlenmesi için kullanılır (Kumar ve ark., 2014). Cevap yüzey fonksiyonunun belirlenmesinde, uygulamada en yaygın deney tasarımı **Merkezi Kompozit Tasarım** yöntemidir (MKT) (Ito ve ark., 2001). Çalışmalardaki karmaşıklığı çözmek için, örneğin CYY ile endüstriyel süreçlerin optimizasyonuna alternatif bir istatistiksel yaklaşım benimsenmelidir. Bu süreç, etkileşimleri ve ikinci dereceden etkileri tahmin etmeye adanmış bir dizi deneysel tekniktir (Elfghi, 2016).

Empedans spektroskopisi, elektronik sistemlerde çok kullanışlı ve önemli bir tekniktir (Asma ve ark., 2010). Dielektrik sabiti ( $\epsilon'$ ), iletkenlik (G), admitans (IYI), süseptans (B), empedans (IZI), direnç (R), reaktans (X) bu elektriksel özelliklerden bazılarıdır (Yakuphanoglu ve ark., 2005). Bu parametreler frekans ve sıcaklıkla değişir ve polimerin kimyasal veya fiziksel durumu hakkında sıcaklık veya frekansa bağlı olarak çok fazla bilgi sağlar (Yakuphanoglu ve ark., 2004). Polimerlerin dielektrik karakteri büyük ölçüde polimerlerin kimyasal yapısından tahmin edilebilir. Elektronik, iyonik, moleküler ve arayüzey polarizasyonu, polimerlerde dielektrik özelliklere neden olur. Konjuge polimerler, yük taşıma mekanizmasına sahiptir. Bu mekanizma, dielektrik spektroskopisi ve alternatif akım (AC) iletkenlik teknikleri ile araştırılabilir (Yakuphanoglu ve ark., 2005).

Empedans (IZI) iç direnç veya alternatif akım direnci olarak da tanımlanabilir. Bir sisteme gerilim uygulandığı zaman; devrenin akıma geçiş için sunduğu direncin bir ölçüsü olarak ifade edilir. Bu parametre, malzemelerin alternatif elektrik akımı uyarımına verdikleri tepkinin bir sonucu olarak ortaya çıkar. Empedans analizi, elektriksel malzemelerde toplam iletkenliğe katkı sağlayan bileşenlerin belirlenmesine olanak tanıyan pratik ve etkili bir yöntemdir. Matematiksel olarak empedans,  $Z = R + jX$  eşitliği ile ifade edilir; burada R direnç (resistans) bileşenini, X ise reaktans terimini temsil eder. Direnç ve empedans değerlerinin, artan frekans ile birlikte azalma eğilimi gösterdiği literatürde rapor edilmiştir (Yakuphanoglu ve ark., 2004). Empedansın birimi ohm ( $\Omega$ ) olup Z sembolü ile gösterilmektedir. Kabuk iletkeninin sınırlı iletkenliği nedeniyle topraklama devresi içerisinde toprak empedansı oluşmakta ve farklı cihazların aynı topraklama empedansını paylaşması elektromanyetik girişimlere yol açabilmektedir. Özellikle kompleks malzemelerde empedans ( $|Z|$ ) ölçümleri, yük taşınım mekanizmalarının karakterizasyonu ve değerlendirilmesi açısından güçlü bir analiz tekniği olarak öne çıkmaktadır (Dinesh ve ark., 2010).

Buradaki amaç, farklı yüzdelerde grafen ile katkılanan bir polimer kompozitin empedans IZI değerini tahmin etmek için CYY deney tasarımının yardımıyla, IZI değeri üzerinde frekansın, voltajın ve grafen oranının etkisini istatistiksel olarak incelemektir. Empedans performansının merkezi kompozit tasarım tabanlı ANOVA ile değerlendirilmesi üzerine bir çalışma yapılmıştır.

## 2. DENESEL TASARIM ve METODOLOJİ

CYY, önemli istatistiksel ve matematiksel yöntemlerden biridir. Bu süreç, çevresel koşulları optimize etmek ve verimliliği artırmak için kullanılır (Bao ve ark, 2010). Yanıt Yüzey Yöntemi fonksiyonlarının belirlenmesinde en yaygın kullanılan tasarım türleri Merkezi Kompozit Tasarım (MKT) yaklaşımıdır (Torğut, 2019). Bu çalışmada da, deneysel tasarım MKT ile gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, işlem değişkenleri olarak voltaj (V), frekans (Hz) ve grafen miktarı (%wt/wt) seçilmiştir. Yönteme yanıt olarak poli(glisidilmetakril-asetoksistiren) kopolimeri ve grafen ile katkılanmış kompozitlerinin (Pihtili, 2022) empedans (IZI) değeri alınmıştır. İstatistiksel sonuçlar, deneysel tasarım ve 20 deney çalışmasının sonuçları Tablo 1'de gösterilmiştir. Bağımsız değişkenlerin seviyesini optimize etmek için Design Expert 7.0 programı kullanılmıştır. Araştırma için seçilen 3 değişkenin kodlaması şu şekilde yapılmıştır. Frekans; (A), Voltaj; (B) ve % Grafen oranı; (C) olarak seçilmiştir. Frekans, uygulanan voltajın ve grafen oranının empedans değeri üzerindeki etkileri değerlendirildi. MKT modellemesinde, doğrusal ve ikinci dereceden modeller tarafından belirlenen faktörlere bağlı cevap değerleri aşağıdaki denklemde olduğu gibi hesaplanır (Tanyol, 2017).

$$R = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \beta_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

Burada, R :yanıt (empedans; IZI),

$x_i, x_j$ ; bağımsız değişkenler,

$\beta_0$  sabit bir katsayı,

$\beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$  sırasıyla doğrusal, ikinci dereceden ve binom etkileşim katsayılarıdır (Lee ve ark.,2014).

**Tablo 1.** Deneysel dizayn ve MKT sonuçları

| Deney<br>Sıra no | Bağımsız Değişkenler |        |         | Yanıt<br>IZI (Ohm) |
|------------------|----------------------|--------|---------|--------------------|
|                  | A (Hz)               | B (V)  | C (%wt) |                    |
| 1                | 1025.00              | 0.00   | 5.00    | 2.71E+009          |
| 2                | 1025.00              | 0.00   | 5.00    | 2.71E+009          |
| 3                | 1604.74              | 11.89  | 7.97    | 1.2E+009           |
| 4                | 1025.00              | 20.00  | 5.00    | 2.71E+009          |
| 5                | 445.26               | 11.89  | 2.03    | 2.97E+009          |
| 6                | 1025.00              | 0.00   | 5.00    | 2.71E+009          |
| 7                | 1025.00              | 0.00   | 0.00    | 2.74E+009          |
| 8                | 1025.00              | 0.00   | 5.00    | 2.71E+009          |
| 9                | 1025.00              | -20.00 | 5.00    | 2.73E+009          |
| 10               | 445.26               | -11.89 | 2.03    | 2.94E+009          |

|    |         |        |       |           |
|----|---------|--------|-------|-----------|
| 11 | 445.26  | -11.89 | 7.97  | 3.83E+009 |
| 12 | 2000.00 | 0.00   | 5.00  | 1.4E+009  |
| 13 | 1604.74 | 11.89  | 2.03  | 9E+008    |
| 14 | 445.26  | 11.89  | 7.97  | 3.79E+009 |
| 15 | 1604.74 | -11.89 | 2.03  | 9.03E+008 |
| 16 | 1025.00 | 0.00   | 5.00  | 2.71E+009 |
| 17 | 1604.74 | -11.89 | 7.97  | 1.22E+009 |
| 18 | 1025.00 | 0.00   | 5.00  | 2.71E+009 |
| 19 | 1025.00 | 0.00   | 10.00 | 5.4E+008  |
| 20 | 50.00   | 0.00   | 5.00  | 3.76E+010 |

### 3. YANIT YÜZEY YÖNTEMİ

MKT, işlem koşulları arasındaki etkileşimi incelemek ve kompozitlerin empedansını optimize etmek için uygulanan bir CYY yöntemidir. Modelin yeterliliği ANOVA ile belirlendi. Tüm regresyon katsayıları hesaplanarak, deneysel yanıt, deneysel faktörlerin empedans üzerindeki etkisini gösteren bir polinom denklemi olarak modellenilebilir. Kodlanmış faktörler (parametreler) kullanılarak elde edilen ve bağımsız değişkenler ile yanıt arasındaki ilişkiyi ifade eden ikinci dereceden fonksiyon denklemde gösterilmiştir. Yazılım olarak Design Expert kullanılmış, bizim elde ettiğimiz deneysel verilere göre, cevap olan IZI değeri ile belirlediğimiz üç değişken arasındaki matematiksel denklem, ikinci dereceden polinom denklemi şeklinde Eşitlik (2)'de gösterilebilir.

$$\begin{aligned} \text{IZI} = & +2.652E+009 - 9.743E+009A - 5.946E+006B - 6.541E+008 C + 1.960E + 005AB + 8.083E \\ & + 008 A C - 4.250E + 006BC + 6.317E+009 A^2 \\ & + 847E+008B^2 + 2.815E + 006 C^2 \end{aligned} \quad (2)$$

Bu denkleme göre; denklemdeki pozitif (+) işaretler sinerjik etkiyi ifade ederken, negatif (-) işaretler ise antagonistik etkiyi göstermektedir (Pihtili,2022). Programın sonucuna göre, IZI değeri üzerinde; 3 bağımsız değişken olan; frekans (A), voltaj (B) ve grafen oranı (C) antagonistik (negatif) etki gösterdiğini söylemek mümkün olur. Bu da saf polimer ve kompozitlerinin empedans değerinin; frekans, ve grafen oranı ile azalacağını ifade etmektedir. Literatürdeki çalışmalarda da frekans ve grafen mikratı arttıkça empedans değerinin azaldığı ifade edilmiştir (Pihtili ve Demirelli, 2019).

#### 3.1. ANOVA

Varyans analizi (ANOVA), deneysel tasarım kapsamında seçilen faktörler arasından hangisinin en etkili olduğunu ortaya koymakta ve incelenen faktörler arasındaki ilişkileri değerlendirmektedir. Ayrıca, elde edilen deneysel verilerin çalışmaya anlamlı bir katkı sağlayıp sağlamadığını ve istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını belirlemeye imkân tanımaktadır (Kumar ve ark., 2009). Her bir katsayının önemi ile bağımsız değişkenler arasındaki etkileşimlerin gücü, p-

değeri ve F-değeri yardımıyla değerlendirilmektedir. Model parametrelerinin kabul edilebilir olarak değerlendirilebilmesi için p-değerinin 0,05'ten küçük ve F-değerinin 1'den büyük olması gerekmektedir (Wang ve ark., 2016). İkinci dereceden modele ait ANOVA sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. Modelin F değeri 38,32 olduğundan model anlamlıdır. Bu kadar büyük bir "Model F değerinin gürültüden kaynaklanma olasılığı sadece %0,01'dir. "Prob > F" değerlerinin 0,0500'den küçük olması, model terimlerinin anlamlı olduğunu gösterir. Bu durumda A, A<sup>2</sup> anlamlı model terimleridir. Negatif bir "Tahmin Edilen R<sup>2</sup>" değeri, genel ortalamanın mevcut modelden daha iyi bir tahmin edici olduğunu gösterir. "Yeterli Hassasiyet", sinyal-gürültü oranını ölçer. 4'ten büyük bir oran arzu edilir. 25.652 oranımız yeterli bir sinyali gösterir. Bu model, tasarım alanında gezinmek için kullanılabilir.

**Tablo 2.** Varyans analizi (ANOVA)

| Kaynak         | Kareler toplamı | Serbestlik derecesi | Ortalama kare | F- değeri  | p-değeri | Anlamlılık    |
|----------------|-----------------|---------------------|---------------|------------|----------|---------------|
| Model          | 1.176E+021      | 9                   | 1.306E+020    | 38.32      | 0.0001   | <i>önemli</i> |
| A-Frekans      | 7.536E+020      | 1                   | 7.536E+020    | 221.03     | < 0.0001 |               |
| B-Voltaj       | 2.000E+014      | 1                   | 2.000E+014    | 5.866E-005 | 0.9941   |               |
| C-Grafen       | 2.420E+018      | 1                   | 2.420E+018    | 0.71       | 0.4318   |               |
| AB             | 9.005E+010      | 1                   | 9.005E+010    | 2.641E-008 | 0.9999   |               |
| AC             | 1.531E+018      | 1                   | 1.531E+018    | 0.45       | 0.5277   |               |
| BC             | 7.225E+013      | 1                   | 7.225E+013    | 2.119E-005 | 0.9965   |               |
| A <sup>2</sup> | 5.235E+020      | 1                   | 5.235E+020    | 153.54     | < 0.0001 |               |
| B <sup>2</sup> | 1.941E+018      | 1                   | 1.941E+018    | 0.57       | 0.4791   |               |
| C <sup>2</sup> | 1.039E+014      | 1                   | 1.039E+014    | 3.048E-005 | 0.9958   |               |

$R^2 = 0.9829$ , Ayarlanmış  $R^2 = 0.9572$ , Tahmini  $R^2 = 0.9422$ , Yeterli hassasiyet = 25.652

### 3.2. 3D Grafikleri

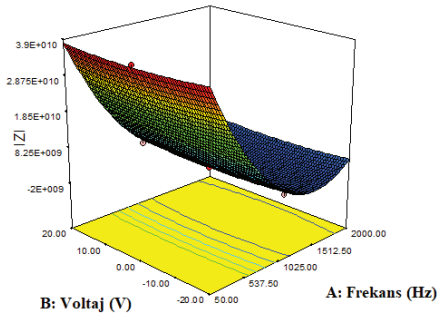
Empedans değeri üzerindeki iki bağımsız değişkenin etkileri 3D grafikleri ile gösterilmiştir. Bu grafikler, seçilen değişkenlerin polimerin empedans değeri (IZI) üzerindeki etkisini incelemek için oluşturulmuştur (Mohomed ve ark., 2005; Feng, 2010). Grafiklerin hepsinde bir değişken sabit tutulup, diğer iki faktörün etkisi gösterilir. Şekil 2'de verilen yanıt yüzeyi grafikleri, frekans (A), uygulanan voltaj (B) ve grafen oranı (C) parametrelerinin incelenen elektriksel yanıt (Z) üzerindeki bireysel ve etkileşimli etkilerini göstermektedir. Grafikler, özellikle frekans ve grafen oranının sistemin elektriksel davranışı üzerinde belirleyici rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Şekil 1(a)'da frekans ve voltajın Z üzerindeki ortak etkisi görülmektedir. Frekans arttıkça Z değerinin belirgin şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, düşük frekans bölgesinde elektrot-malzeme arayüzünde meydana gelen yük birikimi ve arayüz polarizasyonunun baskın olmasına bağlanabilir. Frekansın artmasıyla birlikte dipol ve arayüz polarizasyon mekanizmalarının alternatif elektrik alanı takip edememesi sonucu Z değerinde azalma meydana gelmektedir. Voltaj artışı ise özellikle düşük frekans bölgesinde Z değerini artırıcı bir etki göstermekte, ancak bu etkinin frekans parametresine kıyasla daha sınırlı olduğu görülmektedir.

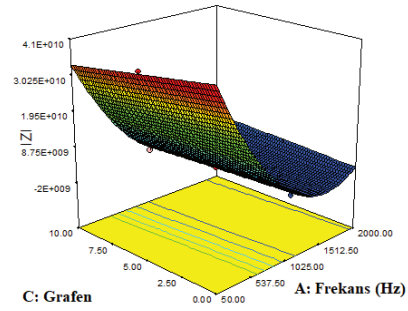
Şekil 1(b)'de frekans ve grafen oranının Z üzerindeki etkileşimi sunulmuştur. Grafen oranındaki artışın, tüm frekans aralığında Z değerini düşürdüğü, bu düşüşün özellikle düşük ve orta frekans bölgelerinde daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. Grafen katkısı ile kompozit yapı içerisinde iletken yolların oluşması ve arayüz sayısının artması, elektriksel iletkenliğin yükselmesine ve dolayısıyla Z değerinin azalmasına neden olmaktadır. Yüksek frekanslarda ise grafenin etkisinin görece azaldığı, bunun da polarizasyon mekanizmalarının yüksek frekanslarda etkinliğini kaybetmesiyle ilişkili olduğu düşünülmektedir.

Şekil 1(c)'de grafen oranı ve voltajın Z üzerindeki ortak etkisi incelenmiştir. Grafen oranındaki artışın Z değerini düşürücü yönde güçlü bir etkiye sahip olduğu açıkça görülmektedir. Buna karşın voltaj artışı, Z değerinde hafif bir artışa neden olmakta olup, bu durum yüksek elektrik alan şiddetlerinde ortaya çıkan ek kayıp mekanizmaları ile ilişkilendirilebilir. Ancak grafenin iletkenlik artırıcı etkisinin, voltajın bu sınırlı etkisini büyük ölçüde baskıladığı görülmektedir.

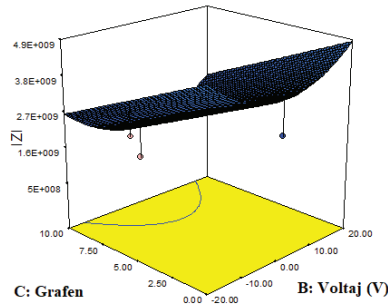
Genel olarak değerlendirildiğinde, frekans ve grafen oranının Z yanıtı üzerinde en etkili parametreler olduğu, voltajın ise ikincil bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Optimum elektriksel özelliklerin elde edilebilmesi için yüksek frekans, yüksek grafen oranı ve orta-düşük voltaj koşullarının tercih edilmesi gerektiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar, grafen katkılı polimer kompozitlerin elektriksel performansının kontrolünde dolgu oranının ve ölçüm frekansının kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.



(a)



(b)



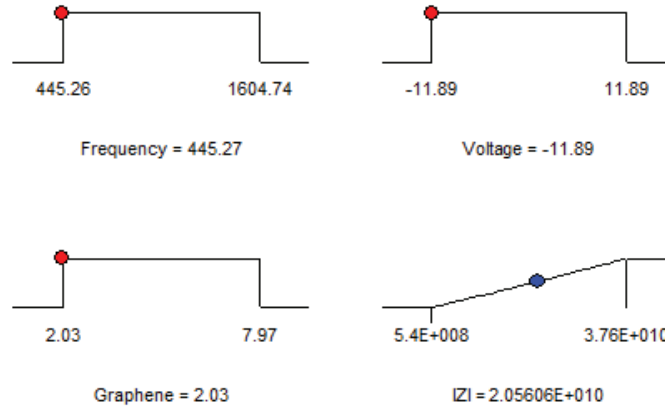
(c)

Şekil 1. Farklı deneysel şartlar için 3D grafikleri

“Desirability” yazılımı ile polimerin empedans değerini maksimize eden değerler belirlenmiştir. Araştırılan cevap için optimum şartlar belirlenmiştir. Şekil 2’te programın verdiği



rampalara ve çalışmada belirlenen referans aralıklarına göre polimer için optimum koşullar; “frekans (Hz) için; 445.27 Hz”, “voltaj için -11.89 V” ve “grafen oranı %2.03(wt%)” olarak çıkmıştır. Bütün bu şartlara göre *IZI* değerini maximuma götüren değer ise “ $2,056 \times 10^9$ ” olarak elde edilmiştir.



Şekil 2. Maksimum empedans değeri için optimum değerler

#### 4. SONUÇ

Bu çalışma polimer kompozitlerin empedans değerinin CYY ile belirlemek için yapılan istatistiksel bir çalışmadır. Grafen katkılı polimer kompozitin elektriksel davranışı; frekans, uygulanan voltaj ve grafen oranı parametreleri dikkate alınarak Yanıt Yüzey Metodolojisi (RSM) kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, incelenen parametrelerin elektriksel yanıt ( $Z$ ) üzerindeki bireysel ve etkileşimli etkilerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ortaya koymuştur.

Yapılan analizler, frekans parametresinin  $Z$  üzerinde en baskın etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Frekans arttıkça  $Z$  değerinin belirgin şekilde azalması, düşük frekanslarda etkili olan elektrot–arayüz polarizasyonu ve yük birikimi mekanizmalarının yüksek frekanslarda etkinliğini kaybetmesiyle açıklanmıştır. Bu durum, kompozit sistemin alternatif elektrik alan altındaki dinamik yanıtının frekansa duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Grafen oranındaki artışın, tüm frekans aralığında  $Z$  değerini düşürdüğü ve özellikle düşük ve orta frekans bölgelerinde bu etkinin daha belirgin olduğu belirlenmiştir. Grafen ilavesi ile kompozit yapı içerisinde iletken yolların oluşması ve arayüz sayısının artması, elektriksel iletkenliğin yükselmesine ve dolayısıyla  $Z$  değerinin azalmasına katkı sağlamıştır. Bu sonuçlar, grafenin kompozit sistemin elektriksel performansını iyileştiren etkili bir dolgu maddesi olduğunu göstermektedir.

Uygulanan voltajın  $Z$  üzerindeki etkisinin frekans ve grafen oranına kıyasla daha sınırlı olduğu tespit edilmiştir. Voltaj artışı özellikle düşük frekanslarda  $Z$  değerinde kısmi bir artışa neden olmakla birlikte, grafenin iletkenlik artırıcı etkisi bu durumu büyük ölçüde baskılamıştır. Bu bulgu, kompozit sistemin elektriksel yanıtının esas olarak malzeme yapısal özellikleri ve ölçüm frekansı tarafından kontrol edildiğini ortaya koymaktadır.

Genel olarak, düşük  $Z$  değerlerinin elde edilebilmesi için yüksek frekans, yüksek grafen oranı ve orta–düşük voltaj koşullarının tercih edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Elde edilen bulgular,

grafen katkılı polimer kompozitlerin elektriksel özelliklerinin kontrollü biçimde optimize edilebileceğini ve bu tür malzemelerin sensörler, dielektrik uygulamalar ve elektronik bileşenler gibi ileri teknolojik alanlarda potansiyel kullanım olanaklarına sahip olduğunu göstermektedir.

**KAYNAKLAR**

- Asma, B.; Afzal, M.; Javed, A.; Nadeem, M.; Hassan, M. M. (2010). Dielectric and impedance studies of DBSA doped polyaniline/PVC composites. *Curr. Appl. Phys.*, 10, 601–606.
- Calban, T., Colak S., Yesilyurt, M. (2006). Statistical modeling of Chevreul's salt recovery from leach solutions containing copper, *Chem. Eng. Process.*, 45, 168.
- Dinesh, P., Renukappa, N.M., and Siddaraiah, 2010. Impedance and Susceptance Characterization of Multiwalled Carbon Nanotubes with High Density Polyethylene-Carbon Black Nanocomposites, *Integrated Ferroelectrics*, 116, 128–136.
- Elfgi, F. M.(2016). A hybrid statistical approach for modeling and optimization of RON: A comparative study and combined application of response surface methodology (RSM) and artificial neural network (ANN) based on design of experiment (DOE), *Chem. Engin. Res. Des*, 113, 264.
- El Hassani, K., Beakou, B.H, Kalnina, D., Oukani, E., Anouar, A. (2017). Effect of morphological properties of layered double hydroxides on adsorption of azo dye Methyl Orange, A comparative study. *Applied Clay Science*, 140,124–131.
- Ito, A., Takachi, T., Kitada, K., Aizawa, J., Umita, T. (2001). [Characteristics of arsenic elution from sewage sludge](#) *Appl. Organomet.Chem.*, 15, 266.
- Kumar, R. S., Ananthan, G., Prabhu, A. S. ( 2014) Optimization of medium composition for alkaline protease production by *Marinobacter* sp. GA CAS9 using response surface methodology – A statistical approach *Biocatal. Agric. Biotechnol.*, 3, 191.
- Kumar, R., Singh, R., Kumar, N., Bishnoi, K., Bishnoi, N. (2009). Response surface methodology approach for optimization of biosorption process for removal of Cr (VI), Ni (II) and Zn (II) ions by immobilized bacterial biomass sp. *Bacillus brevis*. *Chemical Engineering Journal.*, 146 (3):401-407.
- Lee, E.J., Lee, J.H., Shin, Y.C., Hwang, D.-G., Kim, J.S., Jin, O.S., Jin, L., Hong, S.W., Han, D.W. (2014). Graphene oxide-decorated PLGA/collagen hybrid fiber sheets for application to Tissue Engineering Scaffolds. *Biomater. Res*, 18, 18-24.
- Mohapatra, S., Pradhan, N., Mohanty, S., Sukla, L. B.(2009). Recovery of nickel from lateritic nickel ore using *Aspergillus niger* and optimization of parameters, *Miner. Eng*, 22, 311.
- Myers, R. H., Montgomery, D. C. (2002). *Response Surface Methodology*. 2th ed., John Wiley & Sons, NewYork.
- Pihtili, G. (2022). Polymer Composites. Graphene-reinforced novel poly(acetoxystyrene-coglycidymethacrylate) composites: Synthesis and optimization of dielectric behaviors using response surface methodology. *Polym. Comp.*, 43, 6426–6441.
- Polymer Tubing, Zeus Industrial Products, <https://www.zeusinc.com>.

- Tanyol, M. (2017). Malahit Yeşili İçeren Atıksuların Fenton Oksidasyon Prosesi ile Renk Gideriminde İşletme Parametrelerinin Optimizasyonu. Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi, 29, 183.
- Tepe, O., Dursun, A. Y. (2021). Optimization of endo-pectinase and pectin lyase production from wheat bran by *Bacillus pumilus* using response surface methodology, Gazi University Journal of Science, , 34, 335.
- Torğut, G. (2019). Fabrication, characterization of poly(MA-co-NIPA)-graphene composites and optimization the dielectric properties using the response surface method (RSM) Poly. Test, 76, 312–319.
- Yakuphanoglu, F.; Okutan, M.; Zhuang, Q.; Han, Z. (2005). The dielectric spectroscopy and surface morphology studies in a new conjugated polymer poly(benzobisoxazole-2,6-diylvinylene). Phys. B, 365, 13–19.
- Yakuphanoglu, F.; Yoo, Y. T.; Okutan, M. (2004). An impedance spectroscopy study in poly(butylene adipate) ionomers. Ann. Phys.-com type, 13, 559–568.

# Bölüm 19

## KIRSAL ALANLARIN DİJİTAL DÜNYASI: WEB TABANLI 3B GÖRSELLEŞTİRME VE ETKİLEŞİM

*Ahmet USLU<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi; Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Tavşanlı Meslek Yüksekokulu Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü. ahmet.uslu1@dpu.edu.tr ORCID No: 0000-0001-8745-423X



## 1. GİRİŞ

Kırsal yerleşimler, toplumsal, ekonomik ve çevresel açıdan önemli bir rol oynamaktadır. Kırsal alanlarda yerleşim düzenleri, yapı tipolojileri ve arazi kullanımı, sürdürülebilir kalkınma, tarımsal planlama ve kültürel miras yönetimi gibi alanlarda doğrudan etkili olmaktadır (Kurowska vd., 2020; Yanbo vd., 2021). Geleneksel yöntemlerle gerçekleştirilen mekânsal analizler, bu alanların karmaşık yapısını ve geniş coğrafi dağılımını ayrıntılı biçimde ortaya koymakta genellikle yetersiz kalmaktadır (Appleton vd., 2002). Bu nedenle, üç boyutlu (3B) mekânsal modelleme teknikleri, kırsal yerleşimlerin yapısını daha doğru, görselleştirilebilir ve ölçülebilir biçimde analiz etme olanağı sunmaktadır (Lin vd., 2021; Cao vd., 2024; Jurado-Rodríguez vd., 2024).

Son yıllarda, açık kaynaklı coğrafi veri platformlarının yükselişi, araştırmacılar ve planlamacılar için daha erişilebilir veri setleri sunmuştur. Özellikle OpenStreetMap (OSM), gönüllü kullanıcılar tarafından oluşturulan ve sürekli güncellenen bir veri tabanı sağlayarak, bina geometrileri, kat sayıları, yükseklik bilgileri ve çatı tipleri gibi 3B mekânsal analiz için temel verileri sunmaktadır (Over vd., 2010; Bagheri vd., 2019). Kırsal alanlarda, yoğun veri kaynaklarının sınırlı olduğu bölgelerde, bu tür kullanıcı tabanlı veri kaynakları maliyet etkin ve hızlı bir çözüm sunar (Vargas-Muñoz vd., 2019; Liu, 2021). Örneğin, geleneksel köy yerleşimlerinin ve tarımsal yapıların konumları OSM verileri kullanılarak 3B modelleme süreçlerine dâhil edilebilir; bu sayede arazi kullanım örüntüleri ve yapı dağılımları görselleştirilebilir (Vargas-Muñoz vd., 2019; Liu, 2021).

Web tabanlı görselleştirme teknikleri, 3B mekânsal verilerin yalnızca görselleştirilmesini değil, aynı zamanda kullanıcılar tarafından etkileşimli olarak incelenmesini de mümkün kılmaktadır (Gaspari, vd., 2023). WebGL ve JavaScript tabanlı kütüphaneler (Three.js, Babylon.js gibi) sayesinde kullanıcılar, model üzerinde yakınlaştırma, döndürme, yapı özelliklerini inceleme ve yerleşim dağılımını analiz etme imkânına sahip olmaktadır (Ferrão vd., 2023; Gaspari vd., 2023). Bu yaklaşımlar, araştırmacıların, karar vericilerin ve kamu kullanıcılarının mekânsal verileri anlamasını kolaylaştırarak, planlama ve yönetim süreçlerine doğrudan katkıda bulunmaktadır (Narayananamy & Chen, 2024)

Kırsal alanlarda 3B mekânsal verilerin web tabanlı görselleştirme ile entegrasyonu, sadece yerleşimlerin statik bir sunumunu sağlamakla kalmaz; aynı zamanda etkileşimli analiz, senaryo oluşturma ve karar destek sistemleri için de temel oluşturur (Qu vd., 2023; Zhao vd., 2022). Örneğin, bir köyün yapısal dağılımı ve arazi kullanım örüntüsü 3B olarak modellenip web tabanında sunulduğunda, kullanıcılar farklı bakış açılarıyla yapıları inceleyebilir, çatı yüksekliklerini karşılaştırabilir ve yerleşim alanlarının çevresel etkileşimlerini gözlemleyebilirler. Bu tür uygulamalar, özellikle kırsal alanlarda planlama süreçlerinin şeffaflığını artırmakta ve paydaşlar arası iletişimi kolaylaştırmaktadır (Yu vd., 2020; Wang vd., 2023).

Literatürde önceki 3B modelleme ve web tabanlı görselleştirme çalışmaları, kentsel alanlara odaklanmıştır (Zhang vd., 2014; Uray vd., 2015; Trubka vd., 2016; Congiu vd., 2023; Dursun & Varlık, 2023; Gaspari vd., 2023; Yu vd., 2023; Shirowzhan vd., 2024; Usta vd., 2024; Varlık & Dursun, 2024; Demme vd., 2025). Kırsal yerleşimlerin kendine özgü düşük yapı yoğunluğu, farklı mimari özellikleri ve geniş coğrafi yayılımı göz ardı edilmiştir. Bu durum, kırsal alanların mekânsal yapısını değerlendirmede ve interaktif görselleştirme ile sunmada bir eksiklik oluşturmaktadır. Bu bağlamda, kırsal yerleşimlerin 3B mekânsal sunumu ve web tabanlı etkileşimli görselleştirilmesi,

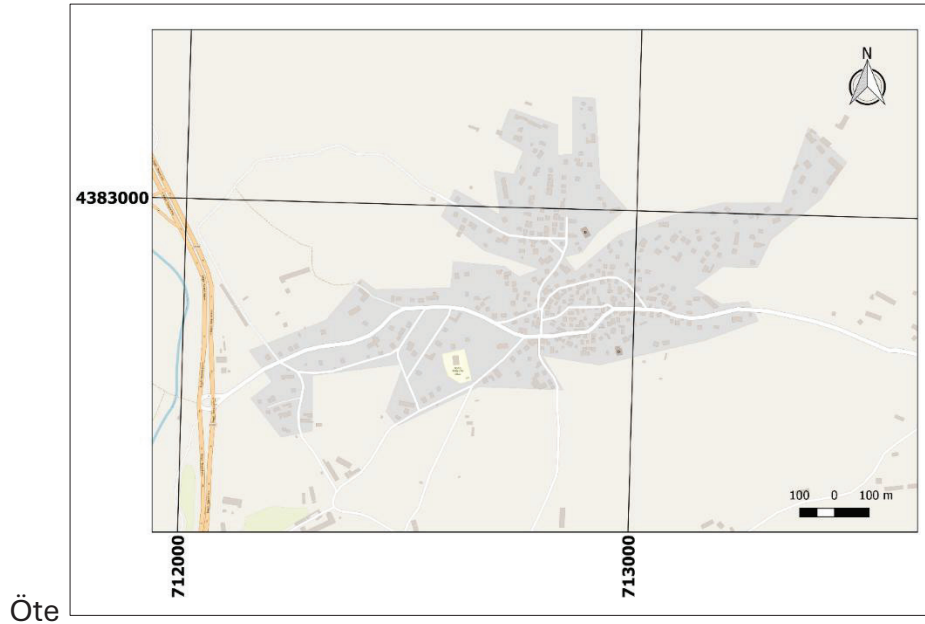
literatürde henüz yeterince ele alınmamış bir konudur. Kırsal alanlar, kentsel alanlardan farklı olarak yapı yoğunluğu, arazi kullanımı ve geleneksel mimari özellikler açısından çeşitli zorluklar ve fırsatlar sunmaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, Kütahya ili, Tavşanlı ilçesi Beyköy Mahallesi örneği üzerinden, kırsal alanların web tabanlı 3B görselleştirme ve etkileşim yöntemleriyle dijital temsillerini gerçekleştirmektir. Bu çerçevede, mekânsal veri üretimi, 3B modelleme ve interaktif görselleştirme süreçleri bir araya getirilerek, kırsal alanların yapısal ve çevresel özelliklerini kullanıcıların kolayca anlayabileceği, keşfedebileceği ve etkileşimde bulunabileceği bir dijital platform oluşturulması hedeflenmektedir. Böylece bölüm, kırsal alanların dijital dünyadaki temsili ve etkileşimli analizi için hem teorik hem de uygulamalı bir rehber sunmaktadır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1.Çalışma Alanı

Bu çalışmanın uygulama alanı, Türkiye'nin Kütahya ili, Tavşanlı ilçesi, Beyköy Mahallesi'dir. Beyköy Mahallesi, yakın zamanda köy statüsünden çıkarılarak mahalle statüsü kazanmıştır. Kırsal karaktere sahip bir yerleşim birimi olarak tarımsal alanlar, yerleşim dokusu ve doğal çevre öğelerini bir arada barındırmaktadır. Mahalle, bölgesel topoğrafya ve arazi kullanımı bakımından çeşitlilik göstermekte; tarım alanları, yerleşim alanları, yollar ve diğer altyapı unsurları kırsal mekân planlaması için önemli veri kaynakları sunmaktadır. Coğrafi konumu ve yapısal özellikleri, Beyköy Mahallesi'ni kırsal alanlarda web tabanlı 3B görselleştirme ve etkileşim çalışmaları için uygun bir pilot alan hâline getirmektedir. Bu nedenle Beyköy Mahallesi, kırsal alanların dijital temsili ve etkileşimli görselleştirme yöntemlerinin uygulanabilirliğini göstermek için seçilmiş bir örnek alan olarak çalışmada kullanılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Çalışma alanının coğrafi konumu

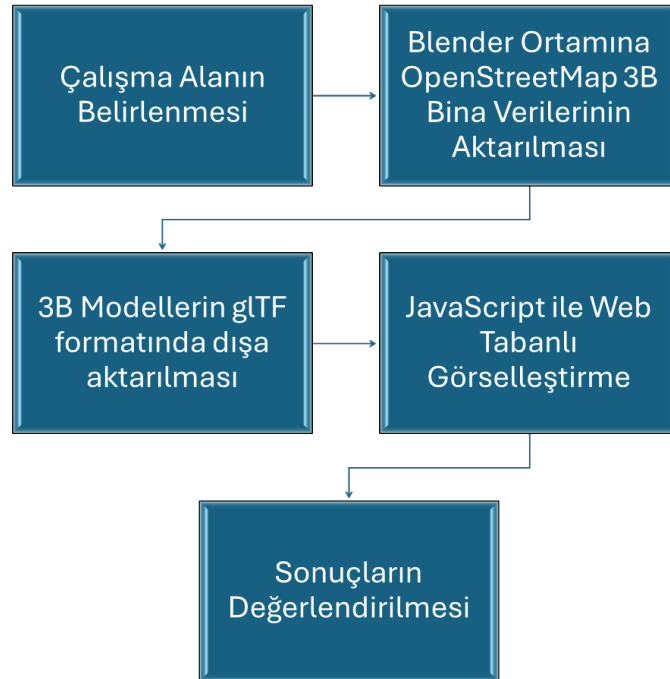


## 2.2.Çalışmanın Materyalleri

Bu çalışmada, Kütahya ili, Tavşanlı ilçesi Beyköy Mahallesi için web tabanlı 3B görselleştirme çalışmaları kapsamında OSM 3D verileri ve dijital yükseklik modelleri (DEM) temel veri kaynakları olarak kullanılmıştır. Elde edilen veriler, Blender yazılımına aktarılmış ve burada binalar, arazi ve çevresel öğeler gerçek boyutlarıyla modellenmiştir. Oluşturulan modeller, glTF formatında dışa aktarılmış ve Three.js kullanılarak HTML5/WebGL ortamında interaktif sahne hâline getirilmiş, kullanıcıların yakınlaştırma, dönme ve katman kontrolü gibi etkileşimleri deneyimlemesi sağlanmıştır. Bu materyal ve araç seçimi, Beyköy Mahallesi'nin dijital temsili için hem doğru hem de web tabanlı etkileşimli bir platform sunmaktadır.

## 2.3.Çalışmanın Yöntemi

Bu çalışmada, Kütahya ili, Tavşanlı ilçesi Beyköy Mahallesi'nin web tabanlı 3B görselleştirme ve etkileşim uygulaması, mekânsal veri toplama, 3B modelleme ve web tabanlı sahne oluşturma adımlarını kapsayan bir metodoloji ile gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, mahalledeki binalar, yollar, arazi konturları ve doğal çevre öğeleri için OpenStreetMap (OSM) 3D verileri ve dijital yükseklik modelleri (DEM) kullanılmıştır. Elde edilen veriler, Blender yazılımına aktarılmış ve burada binalar, arazi ve çevresel öğeler gerçek boyutlarıyla modellenmiştir. Modelin web ortamına aktarımı için Blender'de oluşturulan sahneler glTF formatında dışa aktarılmış ve HTML5/WebGL tabanlı interaktif sahneler Three.js kütüphanesi kullanılarak oluşturulmuştur. Kullanıcıların sahnede yakınlaştırma, dönme ve katman kontrolü gibi etkileşimleri deneyimleyebilmesi için OrbitControls eklenmiş, sahne performansı ve erişilebilirliği göz önünde bulundurularak optimizasyon yapılmıştır. Bu metodoloji sayesinde Beyköy Mahallesi'nin dijital temsili, hem gerçekçi ve doğru hem de web tabanlı interaktif görselleştirme için kullanıcı dostu bir platform hâline getirilmiştir. Şekil 2'de çalışmanın yöntemi gösterilmektedir.



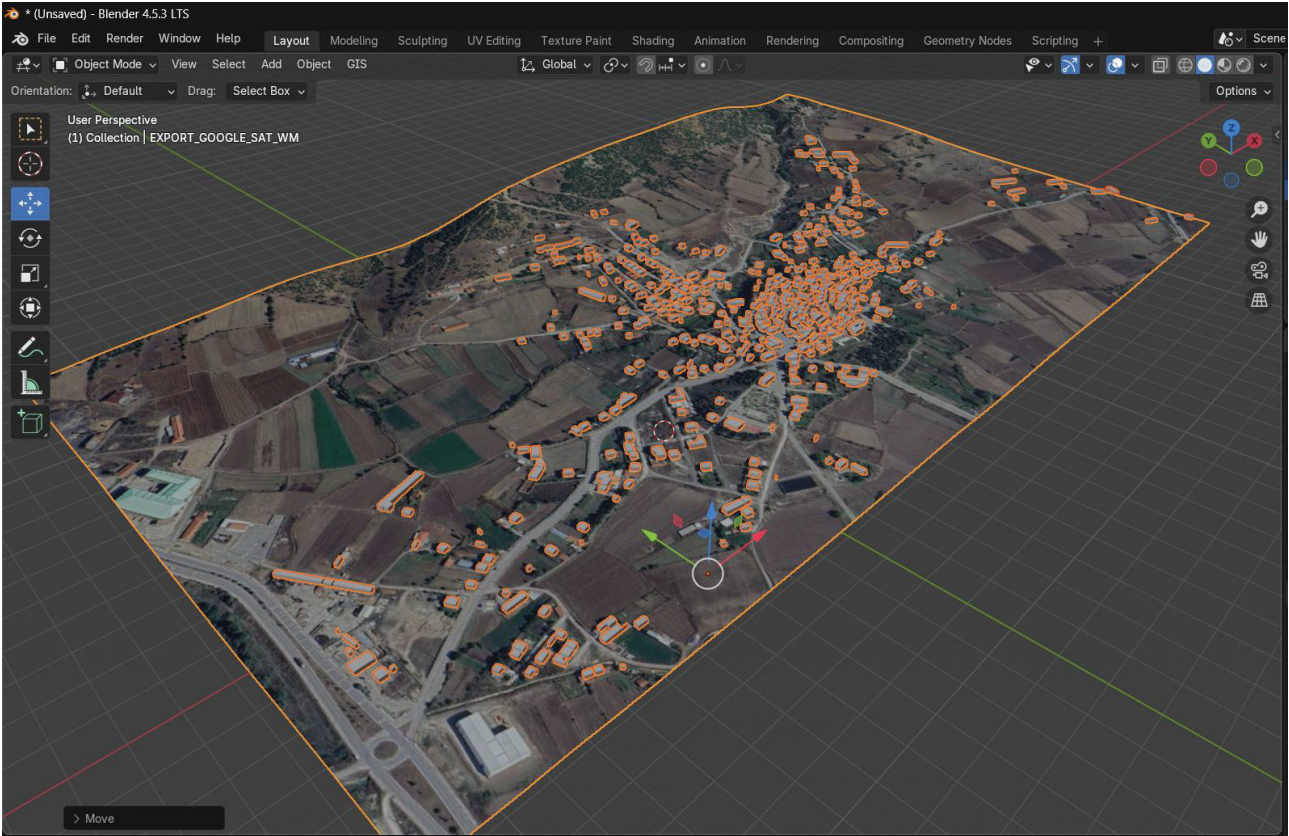
Şekil 2. Çalışmanın yöntemi

### 3. BULGULAR

Bu çalışmada elde edilen bulgular, Beyköy Mahallesi'nin 3B dijital temsili ve web tabanlı etkileşim olanakları açısından önemli bilgiler sunmaktadır. Blender'de modellenen mahalle yapıları, arazi konturları ve çevresel öğeler, glTF formatı ile dışa aktarılmış ve Three.js kullanılarak HTML5 ortamında interaktif bir sahne hâline getirilmiştir. Kullanıcılar, sahnede yakınlaştırma, dönme ve katman kontrolü gibi etkileşimleri deneyimleyebilmiş, binalar, yollar ve doğal arazi katmanlarını ayrı ayrı görüntüleyebilmişlerdir. Bu sayede mahalledeki yapı yoğunluğu, tarımsal alanlar ve arazi yapısı görsel olarak anlaşılır hâle gelmiş ve topografik farklılıklar net bir şekilde ortaya konmuştur.

#### 3.1.3B Modelleme

Kırsal yerleşimlerin 3B modelleri, öncelikle OpenStreetMap (OSM) ve ek coğrafi veri kaynakları kullanılarak Blender ortamında oluşturulmuştur (Şekil 3). Çalışma alanında 118 adet yapı yer almakta olup, bu yapılar çoğunlukla 1–2 katlıdır. Web tabanlı görselleştirme için performansı artırmak amacıyla gereksiz detaylar giderilerek model optimize edilmiştir. Ayrıca, kullanıcı deneyimini iyileştirmek ve render süresini azaltmak için LOD 1 (Level of Detail 1) yöntemi uygulanmıştır. Bu aşamada elde edilen 3B modeller, hem kırsal yerleşimlerin mekânsal yapısını doğru bir şekilde temsil etmekte hem de sonraki web tabanlı görselleştirme aşamasına uygun hâle gelmektedir.



Şekil 3. Çalışma alanının Blender ortamında 3B modeli

LOD 1 seviyesinde oluşturulan 3B modeller, web tabanlı görselleştirme için glTF 2.0 formatına aktarılmıştır. Bu format, malzeme, renk ve temel ışıklandırma bilgilerini korurken, WebGL ile tam

uyum sağlar ve tarayıcı üzerinde hızlı yükleme ve render imkânı sunar. Bu aşama, 3B modellerin hem mekânsal doğruluğunu korumasını hem de web tabanlı etkileşim için uygun hale gelmesini sağlamıştır.

### 3.2. JavaScript ile Web Tabanlı Görselleştirme

LOD 1 seviyesinde oluşturulan ve glTF 2.0 formatına aktarılmış 3B modeller, web tabanlı görselleştirme için Three.js kütüphanesi kullanılarak entegre edilmiştir. Öncelikle sahne, kamera ve renderer oluşturularak modellerin görüntülenebileceği temel ortam hazırlanmıştır; perspektif kamera ile kullanıcının bakış açısı optimize edilmiş, renderer tarayıcıya eklenmiştir. Modellerin gerçekçi görünmesi için sahneye ambient ve directional ışık eklenmiş, mekânsal derinlik ve estetik doğruluk sağlanmıştır. Yükleme aşamasında GLTFLoader kullanılarak LOD 1 seviyesindeki modeller sahneye eklenmiş ve yükleme hataları kontrol edilmiştir. Kullanıcı etkileşimi için OrbitControls ile yakınlaştırma, döndürme ve pan kontrolleri sağlanmış, hareketler damping faktörü ile akıcı hâle getirilmiştir. Ayrıca, Raycaster kullanılarak binalara tıklama ile kat sayısı ve çatı tipi gibi bilgiler görüntülenebilmiş, böylece kullanıcı sadece görselleştirme değil mekânsal analiz de yapabilmıştır. Sahnenin sürekli render edilmesi için requestAnimationFrame döngüsü uygulanmış ve kontrollerin güncellenmesi ile tüm etkileşimler anlık olarak sahneye yansıtılmıştır. LOD 1 kullanımı, poligon optimizasyonu ve gereksiz materyal/doku kullanımının sınırlandırılması, tarayıcı performansını artırmış ve geniş kırsal alanların akıcı bir şekilde görüntülenmesini sağlamıştır. Genel olarak, bu aşama, web tabanlı 3B görselleştirmenin hem performans hem de kullanıcı etkileşimi açısından başarılı bir şekilde uygulanmasını mümkün kılmıştır.

#### 3.2.1. Sahne, Kamera ve Renderer Oluşturma

Web tabanlı 3B görselleştirmenin temelini sahne, kamera ve renderer oluşturur. Sahne (Scene), modellerin, ışıkların ve diğer görsel öğelerin yerleştirileceği sanal ortamı sağlar. Kamera (Camera), sahneyi kullanıcıya gösterecek bakış açısını ve perspektifi belirler. Bu çalışmada perspektif kamera (PerspectiveCamera) kullanılmış, uzaklık ve açı değerleri kırsal alanın tamamını kapsayacak şekilde ayarlanmıştır. Renderer, sahneyi tarayıcıya çizmek için gereklidir ve WebGL tabanlı yüksek performans sunar. Renderer'ın boyutu tarayıcı pencere boyutuna göre ayarlanmış ve DOM'a eklenmiştir, böylece model web ortamında görüntülenebilir hâle gelmiştir (Şekil 4).

```
// Sahne oluşturma
const scene = new THREE.Scene();

// Kamera oluşturma
const camera = new THREE.PerspectiveCamera(
  75,
  window.innerWidth / window.innerHeight,
  0.1,
  1000
);
camera.position.set(0, 50, 100);

// Renderer oluşturma
const renderer = new THREE.WebGLRenderer({ antialias: true });
renderer.setSize(window.innerWidth, window.innerHeight);
document.body.appendChild(renderer.domElement);
```

## Şekil 4. Web sahnesi, kamera ve renderer kurulumu

### 3.2.2. Işıklandırma Eklenmesi

3B modellerin gerçekçi görünmesi için sahneye ışık eklenmesi şarttır. Bu çalışmada ambient light (çevresel ışık) ve directional light (yönlü ışık) kullanılmıştır. Ambient light, sahnedeki tüm nesnelere eşit ışık sağlar ve gölgelerin aşırı koyulaşmasını önler. Directional light, güneş ışığını simüle ederek modellerin daha doğal ve derinlikli görünmesini sağlar. Işıkların konum ve yoğunlukları, sahnenin aydınlatmasını optimize edecek şekilde ayarlanmıştır. Bu aşama, modellerin web ortamında hem estetik hem de mekânsal olarak anlaşılır olmasını sağlamaktadır (Şekil 5).

```

javascript

// Ambient ışık
const ambientLight = new THREE.AmbientLight(0xffffff, 0.6);
scene.add(ambientLight);

// Directional ışık
const directionalLight = new THREE.DirectionalLight(0xffffff, 0.8);
directionalLight.position.set(100, 100, 100);
scene.add(directionalLight);

```

Şekil 5. Sahneye eklenen ambient ve directional ışıklar

### 3.2.3. Model Yükleme (glTF Loader)

LOD 1 seviyesinde oluşturulan modeller, glTF 2.0 formatında sahneye yüklenmiştir. glTF formatı, geometri, malzeme ve renk bilgisini korurken web tarayıcılarında hızlı yükleme sağlar. Loader fonksiyonu, modelin sahneye eklenmesini ve yüklenme durumunun takibini sağlar. Bu aşamada hataların kontrol edilmesi de önemlidir; yükleme başarısız olursa hata mesajı konsola yazdırılır. Böylece modeller, kullanıcı etkileşimi için hazır hâle gelir (Şekil 6).

```

javascript

const loader = new THREE.GLTFLoader();
loader.load('models/kirsal_model.glb', function(gltf) {
  scene.add(gltf.scene);
  console.log("Model yüklendi.");
}, undefined, function(error) {
  console.error(error);
});

```

Şekil 6. LOD 1 seviyesindeki modelin sahneye yüklenmesi

### 3.2.4. Etkileşim Kontrolleri

Kullanıcının modeli rahatça inceleyebilmesi için OrbitControls kullanılmıştır. Bu kontroller sayesinde kullanıcı, sahne üzerinde yakınlaştırma (zoom), döndürme (rotate) ve yatay-dikey kaydırma (pan) yapabilir. Damping faktörü eklenerek hareketler daha akıcı hâle getirilmiştir. Kontrollerin sınırları belirlenerek (ör. maksimum polar açı) sahnenin doğal ve gerçekçi bir biçimde gezilmesi sağlanmıştır. Bu aşama, web tabanlı etkileşim deneyiminin temelini oluşturur (Şekil 7).

```
const controls = new THREE.OrbitControls(camera, renderer.domElement);
controls.enableDamping = true; // Daha akıcı kontrol
controls.dampingFactor = 0.05;
controls.screenSpacePanning = false;
controls.maxPolarAngle = Math.PI / 2;
```

Şekil 7. Kullanıcı etkileşimi için OrbitControls kurulumu

### 3.2.5. Raycaster ile Bilgi Etkileşimi

Kullanıcının binalara tıklayarak bilgi alabilmesi için Raycaster kullanılmıştır. Fare pozisyonu veya dokunmatik ekran koordinatları, sahnedeki 3B nesnelere projeksiyon yapılarak hangi nesneye tıklandığı tespit edilir. Bu sayede bina kat sayısı, çatı tipi gibi veriler dinamik olarak gösterilebilir. Bu etkileşim, kullanıcıya yalnızca görselleştirme değil, aynı zamanda mekânsal analiz yapma imkânı da sunar (Şekil 8).

```
const raycaster = new THREE.Raycaster();
const mouse = new THREE.Vector2();

window.addEventListener('click', (event) => {
  mouse.x = (event.clientX / window.innerWidth) * 2 - 1;
  mouse.y = -(event.clientY / window.innerHeight) * 2 + 1;
  raycaster.setFromCamera(mouse, camera);

  const intersects = raycaster.intersectObjects(scene.children, true);
  if (intersects.length > 0) {
    alert("Bina Kat Sayısı: " + intersects[0].object.userData.kat);
  }
});
```

Şekil 8. Binalara tıklama ile bilgi görüntüleme

### 3.2.6. Animasyon ve Render Döngüsü

Sahne sürekli render edilerek etkileşim ve animasyon sağlanır. requestAnimationFrame fonksiyonu, her tarayıcı çerçevesinde sahnenin yeniden çizilmesini sağlar. OrbitControls güncellemesi de render döngüsüne dahil edilerek kullanıcı etkileşimlerinin anlık olarak sahneye yansıtılması sağlanır. Bu döngü, web tabanlı 3B görselleştirmenin akıcı ve dinamik olmasını mümkün kılar (Şekil 9).

```
javascript

function animate() {
  requestAnimationFrame(animate);
  controls.update(); // OrbitControls güncellemesi
  renderer.render(scene, camera);
}

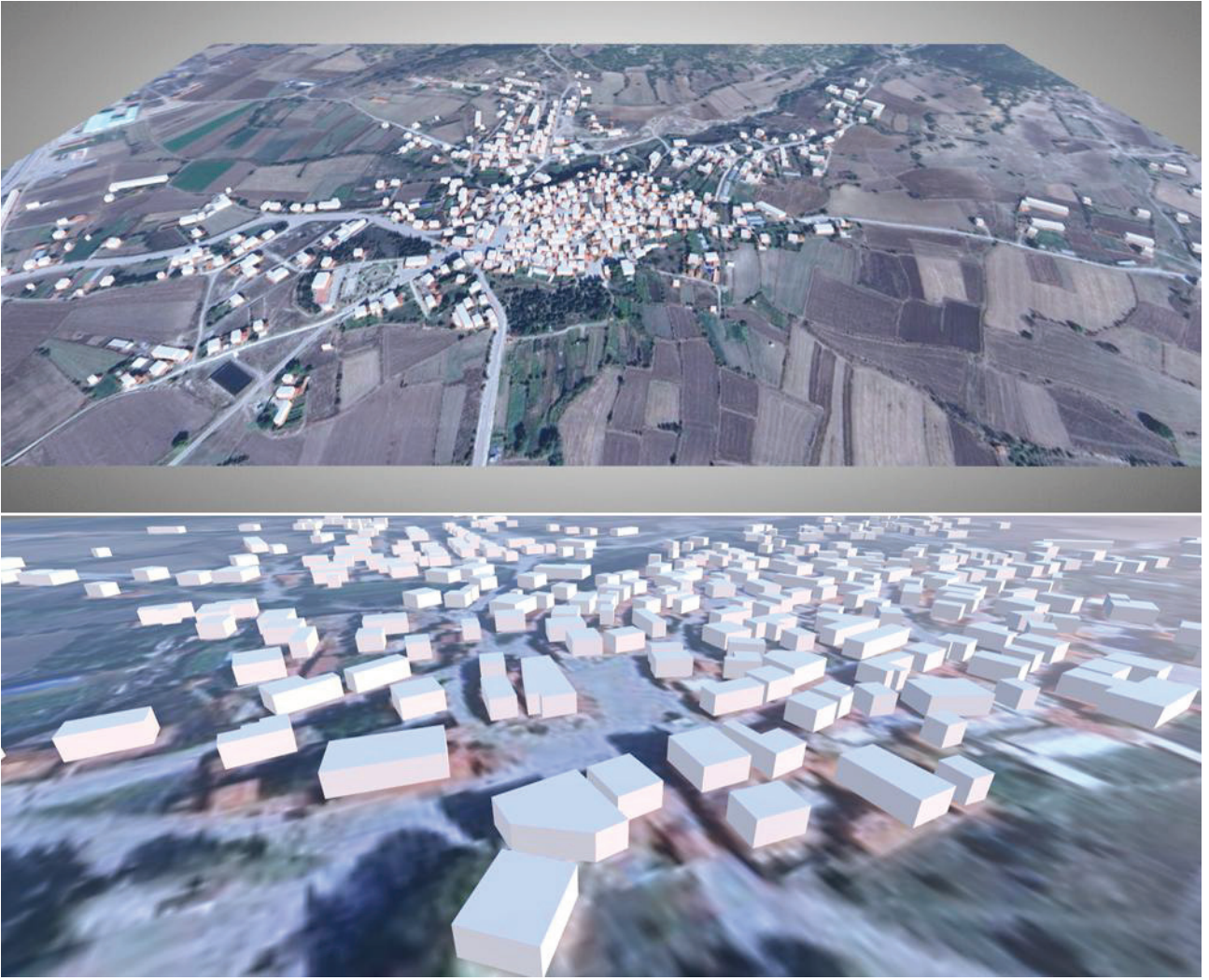
animate();
```

Şekil 9. Sahnenin sürekli render edilmesi ve animasyon döngüsü

### 3.2.7. Web Tabanlı 3B Görselleştirme Çıktılarının Değerlendirilmesi

Blender ortamında modellenen Beyköy Mahallesi'ne ait 3B verilerin glTF formatında dışa aktarılmasının ardından, Three.js tabanlı JavaScript kodlarının çalıştırılmasıyla web tabanlı interaktif bir görselleştirme ortamı başarıyla oluşturulmuştur. Kodun tarayıcı ortamında çalıştırılması sonucunda elde edilen sahne, kullanıcıya herhangi bir ek yazılım veya eklenti gerektirmeden, doğrudan HTML5 destekli bir web arayüzü üzerinden erişilebilir hâle gelmiştir. Bu durum, kırsal alanların dijital temsili açısından erişilebilirlik ve kullanım kolaylığı bakımından önemli bir kazanım sağlamıştır.

Oluşturulan web sahnesinde, kullanıcıların 3B modeli döndürme, yakınlaştırma, uzaklaştırma ve farklı bakış açılarından inceleme gibi temel etkileşimleri gerçek zamanlı olarak gerçekleştirebildiği gözlemlenmiştir. Kod yapısı içerisinde tanımlanan kamera ve ışık ayarları sayesinde, Beyköy Mahallesi'ndeki yapı yerleşim düzeni ve mekânsal ilişkiler görsel olarak algılanabilir hâle gelmiştir. Özellikle arazi yüzeyi ile yapıların konumsal ilişkisi, iki boyutlu haritalara kıyasla daha sezgisel ve anlaşılır bir biçimde sunulmuştur (Şekil 10).



**Şekil 10.** Çalışma alanının Web tabanlı 3B görselleştirilmesi

Web tabanlı görselleştirmenin performans değerlendirmesi incelendiğinde, modelin sadeleştirilmiş geometrisi ve optimize edilmiş dosya boyutları sayesinde sahnenin farklı cihaz ve tarayıcılarda akıcı bir şekilde çalıştığı belirlenmiştir. Bu durum, kırsal alanlara yönelik 3B modellerin yalnızca görsel sunum amacıyla değil, aynı zamanda planlama ve analiz süreçlerinde kullanılacak pratik araçlar olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak, kodun çalıştırılmasıyla elde edilen web tabanlı 3B görselleştirme, Beyköy Mahallesi'nin mekânsal özelliklerini etkileşimli, erişilebilir ve anlaşılır bir biçimde sunmuş; kırsal alanların dijital temsili için Three.js tabanlı web teknolojilerinin uygulanabilirliğini ortaya koymuştur. Bu bulgu, web tabanlı 3B görselleştirme yaklaşımlarının kırsal planlama, mekânsal analiz ve katılımcı süreçlerde etkin biçimde kullanılabilirliğini desteklemektedir.

#### 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, Kütahya ili, Tavşanlı ilçesi Beyköy Mahallesi özelinde kırsal alanların, web tabanlı 3B görselleştirilmesi ve etkileşim yöntemleriyle dijital temsili gerçekleştirmiştir. Çalışmanın temel bulguları, Blender ile modellenen mahalle yapıları ve çevresel öğelerin glTF formatında dışa

aktarılması ve Three.js kullanılarak HTML5 ortamında interaktif bir web sahnesi hâline getirilmesi ile elde edilmiştir. Elde edilen model, kullanıcıların mahalleyi farklı açılardan inceleyebilmesine, yakınlaştırma ve döndürme gibi etkileşimleri deneyimlemesine ve yapı ile arazi katmanlarını ayrı ayrı görüntülemesine olanak sağlamıştır. Bu durum, kırsal alanların mekânsal ilişkilerinin, yapı yoğunluğunun ve arazi topoğrafyasının görsel olarak anlaşılmasını mümkün kılmıştır.

Literatürde web tabanlı 3B görselleştirme ve dijital mekânsal sunumlara odaklanan çalışmalar, ağırlıklı olarak kentsel alanlar ve yoğun yapılaşmış bölgeler üzerinde yoğunlaşmaktadır (Zhang vd., 2014; Trubka vd., 2016; Congiu vd., 2023; Dursun & Varlık, 2023; Gaspari vd., 2023; Yu vd., 2023; Shirowzhan vd., 2024; Usta vd., 2024; Varlık & Dursun, 2024; Demme vd., 2025). Bu çalışmalar, 3B kent modellerinin planlama, çevresel analiz ve karar destek süreçlerinde etkin bir araç olduğunu ortaya koymakla birlikte, kırsal alanlara yönelik uygulamaların sınırlı kaldığını göstermektedir. Mevcut çalışma, bu yönüyle literatürdeki kentsel odaklı yaklaşımlardan ayrılarak, kırsal bir yerleşimi OSM tabanlı veriler ve LOD 1 seviyesinde ele alması bakımından önemli bir katkı sunmaktadır.

Çalışmanın bulguları, web tabanlı 3B modellemenin kırsal alan planlaması, çevresel analiz ve topluluk katılımı süreçleri için uygun ve etkili bir araç olduğunu göstermektedir. İnteraktif sahne üzerinden gerçekleştirilen simülasyonlar, güneşlenme süresi ve gölge analizleri gibi çevresel faktörlerin değerlendirilmesine imkân sağlamış ve tarımsal alanların, binaların ve yolların mekânsal ilişkilerinin anlaşılmasını kolaylaştırmıştır. Bu sayede planlama süreçlerinde veri odaklı karar alma mekanizmalarının desteklenebileceği ortaya konmuştur. Bulgular, ayrıca kırsal alanlarda dijital temsili ve etkileşimli görselleştirmeyi sağlayan web tabanlı platformların eğitim, topluluk katılımı ve farkındalık artırma gibi sosyal uygulamalar için de potansiyel taşıdığını göstermektedir. Beyköy Mahallesi örneği, kırsal alanların mekânsal özelliklerini hem doğru hem de kullanıcı dostu bir şekilde sunabilen interaktif bir platformun uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır.

Öte yandan, çalışma bazı sınırlılıklar içermektedir. OSM verilerinin eksik veya hatalı olabilmesi, bazı binaların veya altyapı öğelerinin tam olarak modellenememesine yol açmıştır. Gelecek çalışmalarda, LiDAR veya fotogrametri verilerinin entegrasyonu ile daha hassas ve detaylı modeller elde edilebilir. Bu tür verilerin entegrasyonu, özellikle bina yükseklikleri, çatı geometrileri ve arazi eğimi gibi unsurların daha gerçekçi biçimde temsil edilmesini sağlayacaktır.

Sonuç olarak, Beyköy Mahallesi örneğinde gerçekleştirilen bu çalışma, kırsal alanların dijital temsili ve web tabanlı 3B etkileşim yöntemlerinin hem teknik hem de uygulama açısından uygulanabilirliğini ortaya koymuş ve kırsal mekân planlaması, çevresel analiz ve topluluk katılımı süreçlerine katkı sağlayabilecek bir metodolojik çerçeve sunmuştur.



**KAYNAKÇA**

- Appleton, K., Lovett, A., Sünnenberg, G., & Dockerty, T. (2002). Rural landscape visualisation from GIS databases: a comparison of approaches, options and problems. *Computers, Environment and Urban Systems*, 26(2-3), 141-162.
- Bagheri, H., Schmitt, M., & Zhu, X. (2019). Fusion of multi-sensor-derived heights and OSM-derived building footprints for urban 3D reconstruction. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(4), 193.
- Cao, Y., Yu, X., & Jiang, F. (2024). Application of 3D image technology in rural planning. *ACM Transactions on Asian and Low-Resource Language Information Processing*, 23(6), 1-13.
- Congiu, E., Desogus, G., Frau, C., Gatto, G., & Pili, S. (2023). WEB-based management of public buildings: A workflow based on integration of BIM and IoT sensors with a WEB-GIS portal. *Buildings*, 13(5), 1327.
- Demme, G., Herget, W., & Slusallek, P. (2025). Fortress city saarlouis: development of an interactive 3D city model using web technologies. In *Across Space and Time* (pp. 408-414). Routledge.
- Dursun, İ., & Varlık, A. (2023, November). Creating digital twins from computer drawings and laser scans: a comparison. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering* (Vol. 176, No. 4, pp. 164-176). Emerald Publishing Limited.
- Ferrão, J., Dias, P., Santos, B. S., & Oliveira, M. (2023). Environment-aware rendering and interaction in web-based augmented reality. *Journal of Imaging*, 9(3), 63.
- Gaspari, F., Ioli, F., Barbieri, F., Rivieri, C., Dondi, M., & Pinto, L. (2023). Rediscovering cultural heritage sites by interactive 3D exploration: A practical review of open-source WebGL tools. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 48, 661-668.
- Herman, L., Popelka, S., & Hejlova, V. (2017). Eye-tracking analysis of interactive 3d geovisualization. *Journal of Eye Movement Research*, 10(3), 10-16910.
- Jurado-Rodríguez, D., Latorre-Hortelano, P., René-Dominguez, L., & Ortega, L. M. (2024). 3D Modeling of rural environments from multiscale aerial imagery. *Computers & Graphics*, 122, 103982.
- Kurowska, K., Marks-Bielska, R., Bielski, S., Aleknavičius, A., & Kowalczyk, C. (2020). Geographic information systems and the sustainable development of rural areas. *Land*, 10(1), 6.
- Lin, G., Giordano, A., Sang, K., Stendardo, L., & Yang, X. (2021). Application of territorial laser scanning in 3D modeling of traditional village: a case study of Fenghuang village in China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(11), 770.
- Liu, Z. (2021). Identifying urban land use social functional units: a case study using OSM data. *International Journal of Digital Earth*, 14(12), 1798-1817.
- Narayanasamy, A. P., & Chen, Y. (2024). Interactive Big Data Visualization for Real-Time Decision-Making in Smart Cities. *Data Science & Big Data Technology*, 2(2), 1-16.

- Over, M., Schilling, A., Neubauer, S., & Zipf, A. (2010). Generating web-based 3D City Models from OpenStreetMap: The current situation in Germany. *Computers, Environment and Urban Systems*, 34(6), 496-507.
- Qu, G., He, J., & Wang, J. (2023, April). Village Web 3D Visualization System Based on Cesium. In *International Conference on Spatial Data and Intelligence* (pp. 89-100). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Shirowzhan, S., Binoy, S. M., & Sepasgozar, S. M. (2024). Web-based BIM-GIS integration workflows for making cities' digital twin 3D models. In *Digital Twin Adoption and BIM-GIS Implementation* (pp. 145-176). Routledge.
- Trubka, R., Glackin, S., Lade, O., & Pettit, C. (2016). A web-based 3D visualisation and assessment system for urban precinct scenario modelling. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 117, 175-186.
- Uray, F., Metin, A., & Varlık, A. (2015). 3D architectural surveying of Diyarbakir wall's Ulu Beden tower with terrestrial laser scanner. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, 73-78.
- Usta, Z., Cömert, Ç., & Akın, A. T. (2024). An interoperable web-based application for 3d city modelling and analysis. *Earth Science Informatics*, 17(1), 163-179.
- Varlık, A., & Dursun, İ. (2024). Three-dimensional web-based client presentation of integrated BIM and GIS for smart cities. *Buildings*, 14(9), 3021.
- Vargas-Muñoz, J. E., Lobry, S., Falcão, A. X., & Tuia, D. (2019). Correcting rural building annotations in OpenStreetMap using convolutional neural networks. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 147, 283-293.
- Wang, Z., Zhu, Z., Zhou, S., Tang, X., Zhu, W., Zhou, P., & Xiao, G. (2023). Mountainous village relocation planning with 3D GIS virtual imaging space model and neural network. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 22(4), 2392-2404.
- Yanbo, Q., Guanghui, J., Wenqiu, M., & Zitong, L. (2021). How does the rural settlement transition contribute to shaping sustainable rural development? Evidence from Shandong, China. *Journal of Rural Studies*, 82, 279-293.
- Yu, L., Zhang, X., He, F., Liu, Y., & Wang, D. (2020). Participatory rural spatial planning based on a virtual globe-based 3D PGIS. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(12), 763.
- Yu, Q., Shang, W. L., Chen, J., & Zhang, H. (2023). Web-based spatio-temporal data visualization technology for urban digital twin. In *Handbook of Mobility Data Mining* (pp. 185-201). Elsevier.
- Zhang, L., Han, C., Zhang, L., Zhang, X., & Li, J. (2014). Web-based visualization of large 3D urban building models. *International Journal of Digital Earth*, 7(1), 53-67.
- Zhao, W., Liang, Z., & Li, B. (2022). Realizing a rural sustainable development through a digital village construction: experiences from China. *Sustainability*, 14(21), 14199.

# Bölüm 20

## BARAJ VE TÜNEL PROJELERİNDE SU YALITIMI İÇİN KİMYASAL ENJEKSİYON UYGULAMALARI

*Veli KESKİN<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Devlet Su İşleri 17. Bölge Müdürlüğü Jeoteknik Hizmetler Şubesi, Van /Türkiye

ORCID: 0000-0003-2769-5044

velikeskin@dsi.gov.tr, veli\_keskin@outlook.com



kritik rol oynar. Doğru malzeme seçimi; yapının mevcut durumu, çatlakların morfolojisi, suyun debisi, zeminin geçirgenliği ve çevresel koşullar göz önünde bulundurularak yapılmalıdır. Bu bağlamda malzemelerin; reaksiyon mekanizması, viskozitesi, sertleşme süresi, genleşme kapasitesi, mekanik dayanımı, elastik özellikleri ve kimyasal stabilitesi seçim sürecinde dikkate alınması gereken temel parametrelerdir (Ulutaş & Gürkan, 2022).

### 2.1. Poliüretan Reçineler

**Çalışma Prensipleri:** Poliüretan reçineler, su ile temas ettiklerinde ekzotermik reaksiyon sonucu genleşerek köpük formuna dönüşür. Bu genleşme, çatlak ve boşlukların hacimsel olarak doldurulmasını sağlar. Reaksiyon hızı ve köpük yoğunluğu, reçinenin formülasyonuna ve kullanılan katalizörlere bağlıdır.

#### Avantajları:

- Ani su girişlerinde hızlı müdahale sağlar.
- Mikro çatlakları doldurabilir.
- Kürlendikten sonra elastikiyetini kısmen koruyarak yapının hareketlerine uyum gösterir.
- Su ile sürekli temas halinde dahi uzun süreli dayanım sağlar.

#### Dezavantajları:

- Yüksek genleşme, kontrol edilmediğinde yapısal basınca neden olabilir.
- Kimyasal reaksiyon sıcaklıkla değişkenlik gösterebilir.

#### Kullanım Alanları:

- Temel ve perde duvarlarda su izolasyonu,
- Yeraltı yapılarında ani su girişlerinin engellenmesi,
- Baraj, tünel ve metro inşaatlarında çatlak enjeksiyonu.

### 2.2 Üreasilikat Bazlı Malzemeler

**Çalışma Prensipleri:** Üreasilikat sistemleri, suda çözünür polimerler olup hızlı polimerleşme eğilimindedir. Yüksek debili su akışının bulunduğu ortamlarda suyun taşıma etkisine rağmen reaksiyona girerek hızlıca katılaşıp ve suyun yolunu kapatır.

#### Avantajları:

- Yüksek akışkanlık sayesinde geniş alanlara yayılabilir.
- Hızlı polimerleşme özelliğiyle acil su kesme işlemlerinde etkilidir.
- Düşük sıcaklıklarda dahi kullanılabilir.

#### Dezavantajları:

- Polimerleşme kontrolü saha koşullarında zorluk yaratabilir.
- Uzun vadede mekanik dayanımı poliüretan ve epoksiye göre daha düşüktür.

#### Kullanım Alanları:

- Tünelde ve şaftlarda yüksek debili su girişlerinin durdurulması,
- Yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu inşaatlarda su izolasyonu,
- Acil müdahale gerektiren altyapı projeleri.

### 2.3 Akrilik Reçineler

**Çalışma Prensipleri:** Akrilik reçineler, çok düşük viskoziteye sahip olmaları sayesinde en ince kılcal boşluklara bile ulaşabilirler. Polimerleşme sonrası esnek, suya dayanıklı ve geçirimsiz bir yapı oluştururlar.

#### Avantajları:

- Kılcal çatlaklara nüfuz edebilme kabiliyeti yüksektir.
- Uzun vadeli elastikiyet ve suya dayanıklılık sağlar.
- Jelleşme süreleri katkı maddeleriyle ayarlanabilir.

**Dezavantajları:**

- Dayanımı epoksi esaslı sistemlere kıyasla daha düşüktür.
- Bazı formülasyonları toksik bileşen içerebilir, bu nedenle çevreye duyarlı alanlarda dikkat gerektirir.

**Kullanım Alanları:**

- Tarihi yapıların çatlak onarımı,
- Tünel ve metro kaplamalarında mikro çatlakların sızdırmazlığı,
- Baraj gövdesi ve su yapılarında uzun süreli yalıtım.

**2.4 Kolloidal Silika**

Çalışma Prensipleri: Kolloidal silika, nanometrik boyutlu SiO<sub>2</sub> partiküllerinin sudaki dispersiyonu şeklindedir. Zemin içerisine enjekte edildiğinde, pH değişimi veya elektrolit eklenmesiyle jel fazına geçer ve zeminin geçirgenliğini azaltır.

**Avantajları:**

- Çevre dostu, toksik olmayan bir malzemedir.
- Çok düşük viskozite sayesinde en küçük boşluklara ulaşabilir.
- Jelleşme süresi saha koşullarına göre ayarlanabilir.

**Dezavantajları:**

- Mekanik dayanımı diğer polimer esaslı sistemlere kıyasla sınırlıdır.
- Büyük çatlaklarda tek başına yeterli olmayabilir.

**Kullanım Alanları:**

- Zemin stabilizasyonu (özellikle kumlu zeminlerde),
- Tünel kaplamalarının su geçirimsizliği,
- Tarihi yapı restorasyonlarında hassas enjeksiyon uygulamaları,
- Nükleer ve çevresel projelerde, düşük toksisite gerektiren alanlarda.

**Tablo 1.** Kimyasal enjeksiyon malzemelerinin özellikleri ve kullanım alanları

| Reçine Türü      | Genleşme  | Viskozite | Kullanım Alanı            | Özellikler                        |
|------------------|-----------|-----------|---------------------------|-----------------------------------|
| Poliüretan       | 20–25 kat | Düşük     | Mikro çatlaklar           | Esnek, hızlı reaksiyon            |
| Üreasilikat      | –         | Orta      | Yüksek debili su akışı    | Hızlı kürlenme                    |
| Akrilik          | –         | Çok düşük | Mikro boşluklar           | Esnek, uzun ömürlü                |
| Kolloidal Silika | –         | Düşük     | Hassas zemin uygulamaları | İnce partikül, yüksek penetrasyon |

**3. Kimyasal Karışım ve Reaksiyon Mekanizmaları**

Kimyasal enjeksiyon malzemeleri, moleküler yapılarına ve sertleşme davranışlarına göre genel olarak iki ana grupta sınıflandırılmaktadır: termoset reçineler ve termoplastik reçineler. Bu ayırım, malzemelerin polimerizasyon süreçleri, sertleşme mekanizmaları, mekanik ve kimyasal özellikleri üzerinde doğrudan etkiye sahiptir (Karol, 2003).

**3.1. Termoset Reçineler**

Termoset reçineler, polimerizasyon sürecinde çapraz bağlanma (cross-linking) reaksiyonları ile sertleşir. Bu süreç sırasında moleküller arası kovalent bağlar oluşur ve üç boyutlu bir ağ yapısı

meydana gelir. Sertleşme işlemi genellikle ekzotermik olup geri dönüşümsüzdür; yani termoset malzeme bir kez kürlendiğinde yeniden şekillendirilemez veya eritilemez.

### Özellikleri

- Yüksek mekanik dayanım ve rijitlik sağlar.
- Kimyasal stabilitesi yüksektir; asit, baz ve solventlere karşı direnç gösterebilir.
- Isıya karşı dayanıklıdır, yüksek sıcaklıklarda dahi formunu korur.
- Su geçirimsizlik ve uzun süreli dayanıklılık gerektiren uygulamalarda etkilidir.

**Kullanım Alanları:** Epoksi, poliüretan ve akrilik reçinelerin belirli türleri bu gruba girer. Özellikle su yalıtımı, çatlak enjeksiyonu, yapısal güçlendirme ve endüstriyel onarım uygulamalarında tercih edilmektedir.

### 3.2. Termoplastik Reçineler

Termoplastik reçineler, termosetlerden farklı olarak çapraz bağlanma reaksiyonuna girmez. Bunun yerine, sıcaklık veya basınç değişimlerine bağlı olarak fiziksel bir sertleşme ve yumuşama davranışı gösterirler. Isıtıldıklarında yumuşar ve akışkan hale gelirler; soğutulduklarında ise tekrar katılaşırlar. Bu süreç tersine çevrilebilir olup, malzemenin tekrar tekrar işlenebilmesine imkân tanır.

### Özellikleri:

- Daha esnek ve tok bir yapı sergilerler.
- Darbelere ve yapısal hareketlere uyum sağlayabilirler.
- Sertleşme mekanizması geri dönüşümlüdür; ısı etkisiyle yeniden şekillendirilebilir.
- Kimyasal dayanımları termoset reçinelere kıyasla genellikle daha düşüktür.

**Kullanım Alanları:** Termoplastik reçineler, özellikle zemin enjeksiyonlarında, düşük deformasyonlu çatlakların doldurulmasında ve hareketli yapı elemanlarında esneklik gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır.

Sonuç olarak, termoset reçineler yüksek dayanım ve uzun süreli stabilite gerektiren yapısal uygulamalarda avantaj sağlarken, termoplastik reçineler elastikiyet ve yeniden işlenebilirlik gerektiren durumlarda tercih edilmektedir. Bu nedenle malzeme seçimi, yalnızca çatlak ya da boşluğun özelliklerine göre değil, aynı zamanda uygulamanın mühendislik hedeflerine uygun olarak yapılmalıdır (Karol, 2003).

**Tablo 2.** Enjeksiyon reçinelerinde kimyasal reaksiyon türleri ve performans

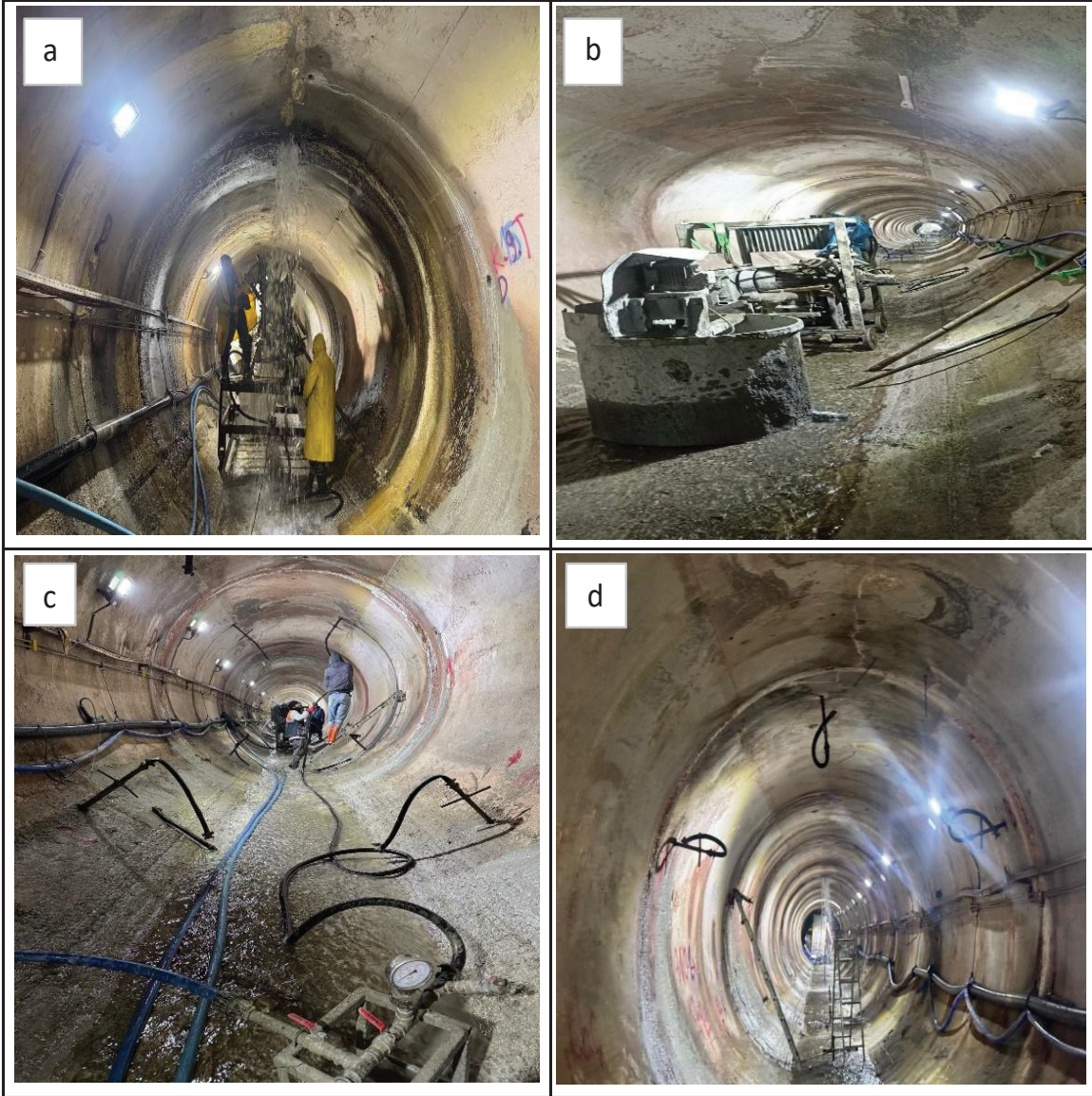
| Reçine Türü | Reaksiyon Türü        | Priz Süresi | Penetrasyon | Performans                    |
|-------------|-----------------------|-------------|-------------|-------------------------------|
| Poliüretan  | Su ile köpükleşme     | 1–3 saat    | Yüksek      | Mikro çatlaklara nüfuz, esnek |
| Epoksi      | Çapraz bağlanma       | 4–12 saat   | Orta        | Yüksek mekanik dayanım        |
| Üreasilikat | Hızlı polimerleşme    | 0,5–1 saat  | Orta        | Ani su akışı engelleme        |
| Akrilik     | Jelleşme ve sertleşme | 1–2 saat    | Çok yüksek  | Kılcal boşluklara nüfuz       |

### 4. Uygulama Yöntemleri

Kimyasal enjeksiyon uygulamaları, çoğu zaman çimento veya kontakt/konsolidasyon enjeksiyonları sonrası uygulanır. Bu sıralama, malzeme verimliliğini artırır ve yapısal bütünlüğü korur.

## Çimento Enjeksiyonu

Çimento enjeksiyonu, özellikle yapı bünyesinde bulunan ana boşlukların ve geniş çatlakların doldurulması amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Bu uygulama, taşıyıcı sistemin bütünlüğünü güçlendirerek yapısal konsolidasyon sağlamaktadır. Ayrıca, büyük ölçekli boşlukların çimento esaslı enjeksiyon malzemeleri ile kapatılması, sonrasında uygulanacak kimyasal enjeksiyon işleminin mikro çatlaklara daha etkin şekilde yönlendirilmesine olanak tanımaktadır. Böylece, farklı ölçeklerdeki boşluk ve çatlakların kademeli olarak doldurulmasıyla hem dayanım artışı sağlanmakta hem de uzun vadeli bir sızdırmazlık elde edilmektedir.



**Şekil 2.** Çimento enjeksiyonu ile büyük boşlukların doldurulması (a) delgi, (b) ara mikser mobilizasyonu, (c) mekanik paker montajı, (d) enjeksiyon sonrası paker körleme çalışmaları (Morgedik Barajı Derivasyon Tüneli).

### 4.1 Kontakt ve Konsolidasyon Enjeksiyonları

Kontakt enjeksiyonu, beton ya da zemin ile yapı yüzeyi arasında oluşan boşlukların doldurulması ve sıkılaştırılması amacıyla uygulanmaktadır. Bu yöntem, özellikle yapı ile zemin arasındaki aderansın artırılmasına katkı sağlamakta ve olası ayrışma ya da gevşekliklerin önüne geçmektedir. Konsolidasyon enjeksiyonu ise, mevcut zeminin veya yapının taşıma kapasitesini yükseltmeye yönelik bir uygulama olup, özellikle zayıf zemin koşullarında ya da taşıyıcı



elemanlarda ek dayanım sağlamak için tercih edilmektedir. Her iki yöntemin ortak hedefi, kimyasal reçinelerin boşluklara maksimum düzeyde nüfuz etmesini sağlayarak yapısal bütünlüğü güçlendirmek ve uzun vadeli stabilite elde etmektir.

Tablo 3. Enjeksiyon sıralaması ve amaçları

| Enjeksiyon Türü                                   | Amaç                                     | Uygulama Zamanı |
|---|--|-----------------|
| Çimento Bazlı Enjeksiyon                          | Büyük boşluk ve çatlakların doldurulması | İlk adım        |
| Kontakt / Konsolidasyon Enjeksiyonu               | Yüzey ve zemin sıkılaştırması            | Çimento sonrası |
| Kimyasal Enjeksiyon (Poliüretan, Akrilik, Silika) | Mikro çatlak ve kılcal boşluk doldurma   | Son adım        |

**Şekil 3.** Çimento ve kimyasal enjeksiyon kombinasyonu ile katmanlı su yalıtımı

#### 4.2 Yüzey ve Çatlak Temizliği

Enjeksiyon uygulamalarının etkinliği, yalnızca kullanılan malzemenin özelliklerine değil, aynı zamanda uygun yüzey ve çatlak hazırlığına da bağlıdır. Bu nedenle, enjeksiyon öncesinde gerçekleştirilen yüzey hazırlığı, enjeksiyon malzemesinin çatlak içerisine nüfuz etmesini ve uzun vadeli aderans sağlamasını mümkün kılar.

##### Temizlik Süreci:

- Öncelikle, çatlakların ve su sızıntısının bulunduğu bölgeler basınçlı su jeti yardımıyla temizlenir. Bu işlem, yüzeydeki gevşek partiküllerin uzaklaştırılmasının yanı sıra, çatlakların ve sızdıran kısımların daha görünür ve belirgin hale gelmesini sağlar.
- Yüzey temizliği sonrasında, çatlak içlerinde ve kenarlarında bulunan zayıf, ayrılmış ya da gevrek parçacıklar mekanik yöntemlerle (tel fırça, hava basıncı, mekanik kazıma vb.) tamamen uzaklaştırılır. Bu sayede enjeksiyon malzemesinin aderansı için sağlam bir zemin elde edilir.

##### Çatlakların Açılması:

- Çatlakların enjeksiyona hazırlanması amacıyla, çatlaklar ortalama 3–5 cm derinliğe ve yaklaşık 3 mm genişliğe kadar açılır. Bu işlem, çatlak boyunca sürekli bir enjeksiyon kanalı oluşturmayı amaçlar.
- Çatlakların uygun ölçülerde açılması, enjeksiyon sırasında malzemenin daha homojen bir şekilde dağılımını ve yeterli penetrasyonunu mümkün kılar.

Çatlak yüzeyinin hazırlığı, enjeksiyon sonrası sızdırmazlık etkinliği, yapısal dayanıklılık ve malzeme-zemin/yapı etkileşimi üzerinde doğrudan etkilidir. Yetersiz temizlik veya çatlakların uygun ölçülerde açılmaması, enjeksiyon malzemesinin yüzeyde birikmesine, boşlukların tam olarak doldurulamamasına ve uzun vadede yeniden su sızıntısı riskine yol açabilir. Bu nedenle çatlak hazırlığı, enjeksiyon sürecinin en kritik aşamalarından biri olarak kabul edilmektedir.



Şekil 3. Kimyasal enjeksiyonda çatlak temizliği ve paker bağlama çalışması.

#### 4.3 Enjeksiyon Deliklerinin Açılması

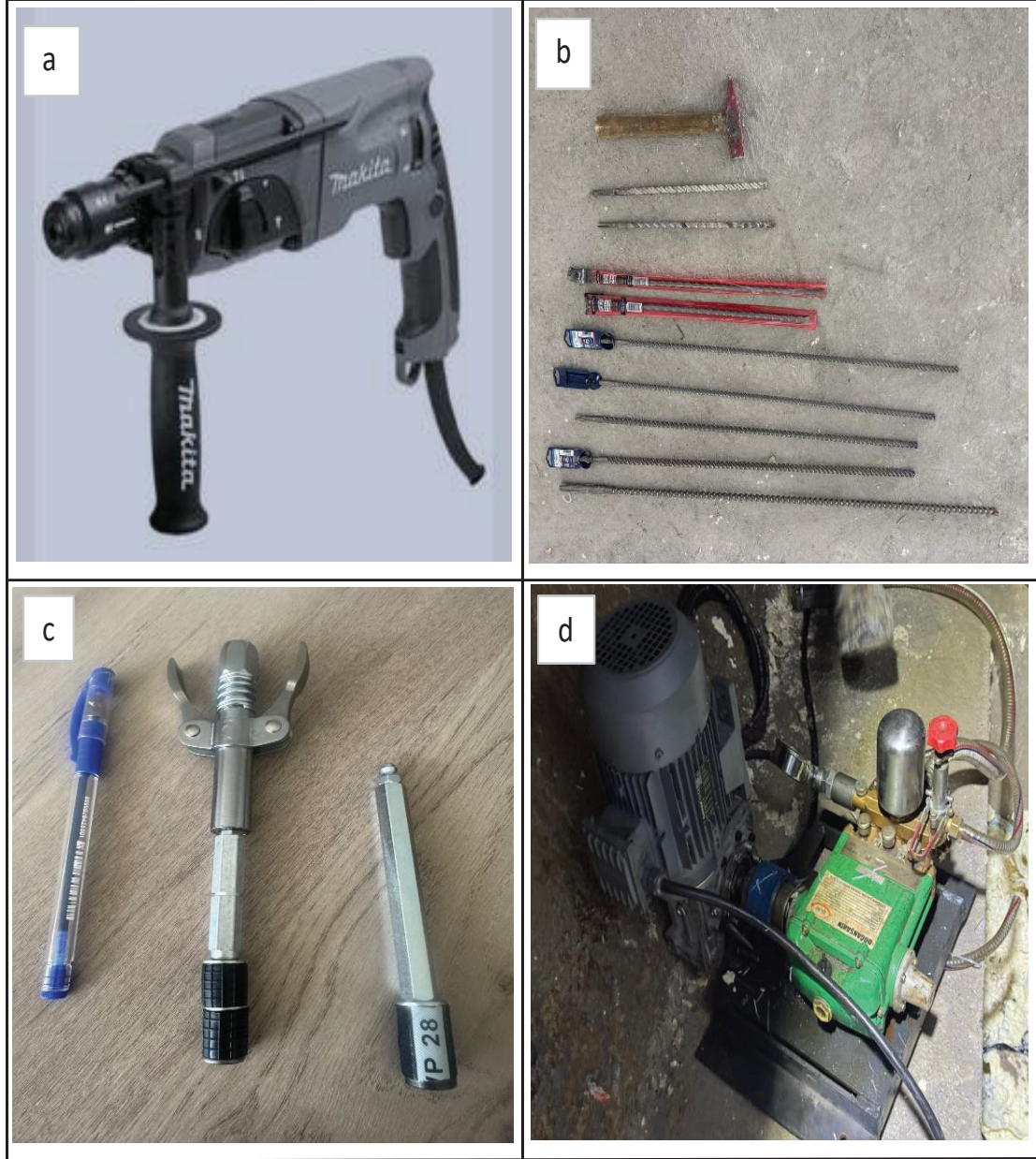
Enjeksiyon uygulamalarında başarıyı belirleyen kritik aşamalardan biri de deliklerin uygun konum, çap ve derinlikte açılmasıdır. Deliklerin yanlış yerleşimi veya yetersiz derinliği, enjeksiyon malzemesinin çatlaklara ulaşmasını engelleyebilir ve işlem etkinliğini düşürebilir.

##### 4.3.1. Delik Yerleşimi:

Çatlak enjeksiyonlarında, delikler genellikle çatlak hattının her iki yanına, 10–15 cm mesafe bırakılarak açılır. Bu uygulama, çatlak boyunca enjeksiyon malzemesinin daha homojen dağılmasını sağlar. Karşılıklı açılan delikler, çatlak hattı boyunca malzemenin ilerlemesini kolaylaştırarak, enjeksiyon sırasında dengeli basınç dağılımı oluşturur.

##### 4.3.2. Delik Çapı:

Uygulamada standart olarak 12mm, 14mm ve 16 mm çapında delikler tercih edilmektedir. Bu çaplar, enjeksiyon pakerlerinin (enjeksiyon hortumu veya valf sistemleri) yerleştirilmesine uygun ölçüdedir ve yeterli malzeme akışına izin verir. Daha dar delikler, malzeme enjeksiyonunu zorlaştırabilir; daha geniş delikler ise yapının bütünlüğüne zarar verebilir.



**Şekil 4.** Uygulamada kullanılan gereçler; (a) matkap, (b) farklı çap delici uçlar, (c) mekanik pakeler ve bağlantı gereçleri (d) enjeksiyon pompası.

#### 4.3.3. Delik Derinliği ve Açısı:

Deliklerin 30 -135cm derinlikte açılması gerekmektedir. Bu derinlik, malzemenin yalnızca yüzeysel bölgede kalmasını engelleyerek, çatlak boyunca daha ileriye ve daha derine nüfuz etmesine yardımcı olur. Delme işlemi genellikle yaklaşık 45° açıyla gerçekleştirilir. Bu açı, deliğin çatlakla kesişmesini kolaylaştırır ve enjeksiyon malzemesinin çatlak içine doğrudan ve etkili bir şekilde ulaşmasını sağlar. Deliklerin uygun şekilde açılması, enjeksiyonun yalnızca yüzeysel bir işlem olmasını engeller ve malzemenin çatlak boyunca derinlemesine ilerlemesini sağlar. Böylece enjeksiyon sonrası hem su geçirimsizlik hem de yapısal bütünlük açısından kalıcı bir çözüm elde edilir. Uygun açı, çap ve derinlikte açılmayan delikler, enjeksiyon sırasında malzeme kaybına, basınç dengesizliğine ve işlem sonrası tekrar sızıntı riskine yol açabilir.



**Şekil 5.** Farklı açılarda açılmış kimyasal enjeksiyonu delgi kesitleri (a) 90°, (b) 60°, (c) 45°, (d) 30° (Morgedik Barajı Derivasyon Tüneli).

#### 4.4 Tamir Harcı Uygulaması

Enjeksiyon uygulamalarında çatlakların geçici veya kalıcı olarak kapatılması, malzeme kaybını önlemek ve enjeksiyon basıncının etkin uygulanmasını sağlamak açısından kritik öneme sahiptir. Bu amaçla çeşitli harç türleri kullanılmaktadır:

##### 4.4.1. Barkimor İnce Tamir Harcı

- **Özellikler:** İnce çatlaklar ve küçük boşluklar için uygundur. Yüksek aderansa sahip olup, yüzeye kolayca tutunur.
- **Uygulama:** Su ile karıştırılarak uygun kıvamda getirilir ve çatlak boyunca doldurulur.
- **Kürlenme Süresi:** Yaklaşık 24 saat.
- **Avantajlar:** Kolay uygulanabilir, çatlak yüzeyine sıkıca tutunur, hızlı sertleşir.

##### 4.4.2. B-Plug Tıkaç Harcı

- **Özellikler:** Kalın kıvamlı, yüksek basınç dayanımlı harçtır. Enjeksiyon sırasında geçici tıkaç olarak işlev görür.

- **Uygulama:** Deliklere veya çatlak girişine yerleştirilir, enjeksiyon sırasında malzemenin kaçmasını önler.
- **Kürlenme Süresi:** 24 saat.
- **Avantajlar:** Basınçlı enjeksiyon sırasında malzemenin yönlendirilmesini sağlar, dayanıklılığı yüksektir (B-Plug Tıkaç Harcı, t.y.).

#### 4.4.3. Çimento Bazlı Tamir Harçları

- **Özellikler:** Hidrolik bağlayıcı içerir; suya ve mekanik yüke karşı dayanıklıdır.
- **Uygulama:** Özellikle geniş çatlaklarda ve yapı yüzeylerinde uygulanır. Gerektiğinde fiber katkılı formülasyonlarla çatlaklarda çatlamaı azaltır.
- **Kürlenme Süresi:** 24–48 saat (ortam sıcaklığı ve nem koşullarına bağlı).
- **Avantajlar:** Ekonomik, yüksek basınç dayanımı, uzun süreli stabilite.

#### 4.4.4. Epoksi Bazlı Tamir Harçları

- **Özellikler:** Termoset reçine içerir; yüksek aderans ve mekanik dayanım sağlar.
- **Uygulama:** Yapısal onarım gereken çatlaklarda kullanılır. Sıvı veya pasta kıvamında olabilir.
- **Kürlenme Süresi:** 12–24 saat (formülasyona göre değişir).
- **Avantajlar:** Kimyasal ve suya dayanıklı, yüksek yük taşıma kapasitesi, uzun ömürlü.

#### 4.4.5. Poliüretan Bazlı Tıkaç Harçlar

- **Özellikler:** Su ile temas ettiğinde genişerek çatlakları doldurur. Elastik yapısı sayesinde hareketli çatlaklara uygundur.
- **Uygulama:** Su sızıntısı olan çatlaklarda veya tünel ve altyapı projelerinde hızlı müdahale için tercih edilir.
- **Kürlenme Süresi:** Hızlı reaksiyon: 10–30 dakika (formülasyona bağlı).
- **Avantajlar:** Ani su girişlerinde hızlı etki, elastik yapısı sayesinde çatlak hareketlerine uyum sağlar.

Kimyasal enjeksiyon, çatlakların ve su sızıntısı bölgelerinin etkin şekilde onarılması ve yapı elemanlarının su yalıtımının sağlanması amacıyla uygulanır. Uygulamanın başarısı, seçilen reçine türü, enjeksiyon yöntemi ve delik hazırlığının doğruluğuna bağlıdır.

#### 4.5.1 DM CRACK F Malzeme Özellikleri:

İki bileşenli, esnek fakat genişmeyen poliüretan reçinedir. Mikro çatlaklara nüfuz ederek su sızıntısını önler. Termoset yapısı sayesinde kürendikten sonra elastikiyetini kısmen korur.

##### 4.5.1.1. Uygulama Yöntemi:

Reçine, önceden açılmış 14 mm çapındaki deliklerden paker yardımıyla çatlak içine enjekte edilir. Esnek yapısı sayesinde çatlak boyunca homojen bir dağılım sağlar ve çatlak hareketlerine uyum gösterir. DM CRACK F, genişme göstermediği için basınç kontrollü uygulamalarda idealdir. Özellikle hareketli çatlakların minimal mekanik deformasyonuna sahip bölgelerde güvenilir su sızdırmazlık sağlar (DM CRACK F, t.y.).

#### 4.5.2. DM PUR WX Malzeme Özellikleri:

İki bileşenli, solvent içermeyen poliüretan reçinedir. Su ile temas ettiğinde 1–3 kat genişir, bu sayede çatlak ve boşlukları mekanik olarak doldurur. Yavaş prizlenme özelliği sayesinde enjeksiyon sırasında malzeme, çatlak boyunca kontrollü bir şekilde yayılır.

##### 4.5.2.1.Uygulama Yöntemi:

Reçine, deliklerden paker yardımıyla enjeksiyon yapılacak bölgeye verilir. Genleşme özelliği sayesinde, hareketlilik beklenmeyen bölgelerde su sızıntısını etkili şekilde önler. DM PUR WX, özellikle hareket beklenmeyen veya düşük deformasyonlu çatlaklarda tercih edilir. Su ile temas sonrası gerçekleşen kontrollü genleşme, çatlak boyunca tam dolgu sağlar ve uzun vadeli sızdırmazlık oluşturur. Solvent içermemesi, çevre ve iş sağlığı açısından avantaj sağlar (DM PUR WX, t.y.).



Şekil 6. Poliüretan reçinenin enjeksiyon uygulama kesitleri (Morgedik Barajı Derivasyon Tüneli).

## 4.6 Kontrol ve İzleme

Bu aşama, enjeksiyon sürecinin etkinliğini değerlendirmek ve olası hataları önceden tespit etmek açısından kritik öneme sahiptir. Enjeksiyon işlemi tamamlandıktan sonra aşağıdaki adımlar uygulanır:

- **Gözlemsel Değerlendirme:** Reçinenin malzeme yüzeyine ve dokusuna nüfuz etme durumu, görsel olarak incelenir. Bu değerlendirme sırasında renk değişimleri, yüzey parlaklığı ve reçinenin yayılımı gibi göstergeler takip edilir.
- **Penetrasyon Derinliğinin İzlenmesi:** Reçinenin malzeme içine ne kadar derinlikte nüfuz ettiği belirlenir. Bu, hem malzemenin dayanıklılığı hem de işlem verimliliği açısından önemlidir. Gerekirse, özel işaretleyiciler veya ışıklandırma teknikleri ile reçinenin dağılımı daha net gözlemlenebilir.
- **Kayıt ve Raporlama:** Gözlemler ve ölçümler, ilerleyen aşamalar için referans oluşturacak şekilde belgelenir. Bu sayede, enjeksiyon kalitesi ve süreç tutarlılığı sürekli olarak izlenebilir.

Bu süreç, hem kalite kontrol hem de malzeme performansının optimize edilmesi açısından vazgeçilmez bir adımdır.

## 5. Uygulama Alanları

Kimyasal enjeksiyon uygulamaları, hem yapısal bütünlüğün korunması hem de **su sızdırmazlığının sağlanması** amacıyla çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Uygulamanın etkinliği, malzeme seçimi ve enjeksiyon tekniğinin doğru uygulanmasına bağlıdır.

### 5.1 Yeraltı Yapıları

- **Metro ve Tüneller:** Yeraltı tünellerinde çatlaklar ve boşluklar, su sızıntısına ve yapısal deformasyonlara yol açabilir. Kimyasal enjeksiyon, çatlakların doldurulmasını ve su geçişinin engellenmesini sağlayarak yapının uzun vadeli dayanıklılığını artırır.
- **İstinat Duvarları ve Barajlar:** Su basıncına maruz kalan beton ve taş yapıların çatlakları, enjeksiyon ile doldurularak su sızdırmazlık sağlanır. Bu uygulama, hem güvenlik hem de yapısal bütünlük açısından kritik öneme sahiptir.

### 5.2 Endüstriyel Tesisler ve Depolama Yapıları

- Kimyasal enjeksiyon, çatlakların ve boşlukların kapatılması ile sızıntı ve korozyon riskini azaltır.
- Özellikle kimyasal maddeler ve su ile temas eden depolama alanlarında, malzemenin kimyasal dayanımı önemlidir. Uygun reçineler seçildiğinde, uzun süreli su yalıtımı ve yapısal koruma sağlanabilir.

### 5.3 Boşluklu veya Gevşek Zeminlerin İyileştirilmesi

- Zemin enjeksiyonu, kumlu, gevşek veya boşluklu zeminlerin taşıma kapasitesini artırır ve oturmaları sınırlar.
- Kolloidal silika veya genleşen poliüretan reçineler kullanılarak, zeminin geçirgenliği azaltılır ve mekanik stabilitesi artırılır.

## 5.4 Tarihi Yapılar ve Kültürel Miras Alanları

- Tarihi yapıların restorasyonunda kimyasal enjeksiyon, çatlakların doldurulması ve su yalıtımı amacıyla düşük viskoziteli ve çevre dostu malzemelerle uygulanır.
- Uygulama sırasında orijinal malzemeye zarar verilmemesi ve estetik bütünlüğün korunması önemlidir.
- Bu yöntem, hem yapısal güçlendirme hem de uzun vadeli korunma sağlar.

Özetle, kimyasal enjeksiyon uygulamaları, su yalıtımı, yapı güçlendirme ve zemin iyileştirme açısından çok disiplinli mühendislik çözümleri sunmaktadır. Malzeme seçimi ve uygulama tekniği, her bir proje tipine ve çevresel koşullara göre optimize edilmelidir.

## 6. Avantajlar ve Dezavantajlar

Kimyasal enjeksiyon yöntemleri, yapı ve zemin iyileştirmelerinde etkili çözümler sunmasına rağmen bazı sınırlamalara sahiptir. Bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

### 6.1. Avantajlar

#### 6.1.1. Mikro Çatlaklara Nüfuz Etme Yeteneği

Düşük viskoziteli reçineler, özellikle poliüretan ve üreasilikat bazlı malzemeler, uygun enjeksiyon teknikleri kullanıldığında mikro çatlaklara ve kılcal boşluklara kadar ilerleyebilme özelliğine sahiptir. Bu durum, yalnızca yüzeysel bir tamir sağlamanın ötesine geçerek yapının derin bölgelerinde de etkin bir sızdırmazlık oluşturur. Böylece, yapının uzun vadede dayanıklılığını artırarak daha güvenli ve sürdürülebilir bir çözüm sunar.

#### 6.1.2. Hızlı Reaksiyon ve Acil Müdahale İmkânı

Poliüretan ve üreasilikat esaslı reçineler, su ile temas ettiklerinde veya uygun oranlarda karıştırıldıklarında kısa sürede kimyasal reaksiyona girerek genleşme ve katılaşma gösterir. Bu özellik, özellikle ani su girişleri, acil onarım gerektiren yapısal problemler veya beklenmedik sızıntı durumlarında hızlı müdahale olanağı sağlar. Böylelikle, şantiye sürecinde zaman kaybı en aza indirilirken, yapı güvenliği kısa sürede yeniden sağlanabilir.

#### 6.1.3. Esneklik ve Uzun Ömürlü Dayanım

Bazı reçine türleri, enjeksiyon sonrasında elastikiyetini koruyarak yapının doğal hareketlerine uyum gösterebilir. Özellikle oturma, genleşme veya titreşim gibi yapısal hareketlerin meydana geldiği durumlarda bu esneklik, çatlakların yeniden oluşmasını engeller. Ayrıca, doğru malzeme seçimi ve kontrollü uygulama ile uzun süreli su yalıtımı ve sızdırmazlık elde edilmesi mümkündür. Bu durum, bakım maliyetlerinin azalmasına ve yapının kullanım ömrünün uzamasına katkı sağlar.

### 6.2. Dezavantajlar

#### 6.2.1. Yüksek Maliyet

Kimyasal enjeksiyon yöntemlerinde kullanılan malzemeler, özel ekipmanlar ve profesyonel işçilik maliyetleri, geleneksel tamir yöntemlerine kıyasla oldukça yüksektir. Bu nedenle, özellikle küçük ölçekli projelerde maliyet etkinliği açısından dezavantaj oluşturabilir. Ancak büyük ölçekli ve kritik öneme sahip projelerde, sağladığı dayanıklılık nedeniyle uzun vadede ekonomik bir çözüm sunabilir.



### 6.2.2. Uzmanlık ve Deneyim Gereksinimi

Kimyasal enjeksiyon yönteminin başarısı; malzemenin doğru seçimine, delik açma tekniklerinin uygunluğuna, enjeksiyon basıncının kontrolüne ve reçinenin kürlenme süresinin doğru yönetilmesine bağlıdır. Bu sebeple, yöntemin uygulanması alanında uzman, deneyimli personel ve mühendislik denetimi olmaksızın istenilen verim elde edilemez. Yanlış uygulamalar, hem maliyet kaybına hem de yapının bütünlüğünün olumsuz etkilenmesine yol açabilir.

### 6.2.3. Çevresel Koşullardan Etkilenebilirlik

Kimyasal enjeksiyon yöntemlerinde kullanılan reçinelerin viskozite değerleri, kürlenme süreleri ve genleşme oranları; sıcaklık, nem, yeraltı su seviyesi ve suyun debisi gibi çevresel faktörlerden doğrudan etkilenmektedir. Bu durum, özellikle saha koşullarının kontrol edilemediği durumlarda uygulamanın etkinliğini düşürebilir. Örneğin, düşük sıcaklıklarda kürlenme süresi uzayabilirken, yüksek debili su girişlerinde reçinenin istenilen şekilde genleşmesi engellenebilir. Bu nedenle, saha koşullarının önceden analiz edilmesi ve malzeme seçiminin buna uygun şekilde yapılması kritik önem taşır.

Tablo 4. Kimyasal Enjeksiyon Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları ile Etki Şiddeti Değerlendirmesi

| Kategori   | Kriter                                | Açıklama   | Etki Şiddeti (1-5)* |
|------------|---------------------------------------|--|---------------------|
| Avantaj    | Mikro Çatlaklara Nüfuz Yeteneği       | Düşük viskoziteli reçineler ve uygun enjeksiyon teknikleri sayesinde, çok küçük çatlak ve kılcal boşluklara bile nüfuz edebilir.   | 5                   |
| Avantaj    | Hızlı Reaksiyon ve Müdahale           | Poliüretan ve üreasilikat bazlı reçineler, su ile temas veya karıştırma sonrası hızlı reaksiyon gösterir, acil onarımlarda etkin çözüm sağlar.                                   | 4                   |
| Avantaj    | Esnek ve Uzun Ömürlü Sonuçlar         | Enjeksiyon sonrası bazı reçineler elastik yapısını korur, yapı hareketlerine uyum sağlar; uzun süreli dayanıklılık sağlar.   | 4                   |
| Dezavantaj | Yüksek Maliyet                        | Kimyasal enjeksiyon malzemeleri ve özel ekipman gerektiren uygulama maliyetleri, geleneksel tamir yöntemlerine kıyasla daha yüksektir.   | 4                   |
| Dezavantaj | Uzmanlık Gereksinimi                  | Doğru malzeme seçimi, delik açma teknikleri, basınç kontrolü ve kürlenme süresine bağlı olarak deneyimli personel ve mühendislik kontrolü zorunludur.                            | 5                   |
| Dezavantaj | Çevresel Koşullardan Etkilenebilirlik | Malzemenin viskozitesi, kürlenme hızı ve genleşme oranı sıcaklık, nem ve su debisi gibi saha koşullarına bağlı olarak değişebilir; enjeksiyon etkinliğini olumsuz etkileyebilir. | 3                   |

\*Not (1 = Çok düşük etki, 2 = Düşük etki, 3 = Orta etki, 4 = Yüksek etki, 5 = Çok yüksek etki)

Kimyasal enjeksiyon ve yapı onarım uygulamaları, hem saha koşullarının karmaşıklığı hem de kullanılan malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri nedeniyle çeşitli riskler içermektedir. Bu nedenle, iş güvenliği prosedürlerinin titizlikle uygulanması, personel sağlığı ve proje güvenliği açısından oldukça önemlidir.

## 7. SONUÇ

Kimyasal enjeksiyon malzemeleri ve uygulama yöntemleri, yapı ve zemin iyileştirme çalışmalarında kritik bir rol oynamaktadır. Malzeme seçimi, uygulamanın başarısını doğrudan etkiler ve reçinelerin viskozitesi, genleşme oranı, kürlenme süresi ve mekanik esnekliği, çatlak genişliği, su debisi ve zemin koşullarına göre belirlenir. Kimyasal enjeksiyon reçineleri termoset ve termoplastik olarak sınıflandırılmaktadır; termoset reçineler çapraz bağlanma yoluyla sertleşerek yüksek mekanik dayanım ve kimyasal stabilite sağlarken, termoplastik reçineler sıcaklık veya basınç değişimi ile sertleşir ve elastik yapılarını korur. Poliüretan, üreasilikat, akrilik reçineler ve kolloidal silika gibi malzemeler, farklı uygulama koşullarına göre seçilerek mikro çatlaklardan geniş boşluklara kadar etkili çözümler sunar. Uygulama öncesi yüzey ve çatlak temizliği, enjeksiyon başarısı açısından kritik bir aşamadır. Basınçlı su jeti ile çatlakların belirgin hâle getirilmesi, zayıf parçacıkların uzaklaştırılması ve çatlakların uygun derinlik ve genişlikte açılması, enjeksiyon malzemesinin etkin şekilde nüfuz etmesini sağlar. Enjeksiyon deliklerinin çatlak hattının her iki yanına 10–15 cm uzaklıkta ve 12, 14, 16 mm çapında açılması, 30–135 cm derinlik ve 45° açıyla delinmesi, basınçlı enjeksiyon sırasında malzemenin homojen dağılımını ve çatlak boyunca etkili sızdırmazlığı temin eder. Çatlaklar, Barkimor İnce Tamir Harcı, B-Plug Tıkaç Harcı, çimento bazlı, epoksi veya poliüretan bazlı harçlarla geçici olarak kapatılarak malzeme kaybı önlenir ve basınç kontrolü sağlanır; kürlenme süreleri genellikle 24 saat olarak belirlenmiştir. Poliüretan reçineler DM CRACK F ve DM PUR WX örneklerinde olduğu gibi, farklı viskozite ve genleşme özellikleri ile mikro çatlaklardan büyük boşluklara kadar etkili çözümler sunar. DM CRACK F, esnek ve genleşmeyen yapısı ile çatlak hareketlerine uyum sağlar ve mikro çatlaklarda su sızdırmazlığı temin ederken, DM PUR WX su ile temas sonrası 1–3 kat genleşerek çatlak ve boşlukları doldurur, yavaş prizlenmesi sayesinde kontrollü dağılım sağlar. Malzeme seçimi, çatlak özellikleri, su debisi ve uygulama hedefleri dikkate alınarak yapılmalıdır. Kimyasal enjeksiyon uygulamaları, yeraltı yapıları (metro, tünel, istinat duvarları, baraj), endüstriyel tesisler ve depolama yapıları, boşluklu veya gevşek zeminlerin iyileştirilmesi ve tarihi yapılar ile kültürel miras alanları gibi geniş bir yelpazede uygulanabilir. Bu uygulamalar, su yalıtımı, yapısal güçlendirme ve zemin stabilizasyonu açısından uzun vadeli ve güvenli çözümler sunar. Kimyasal enjeksiyon yöntemlerinin başlıca avantajları, mikro çatlaklara nüfuz yeteneği, hızlı reaksiyon ve elastik, uzun ömürlü sonuçlar olarak öne çıkarken; dezavantajları yüksek maliyet, uzmanlık gereksinimi ve çevresel koşullardan etkilenebilirlik olarak belirlenmiştir. Doğru malzeme seçimi, planlama ve saha yönetimi ile bu dezavantajlar minimize edilebilir. Uygulama sürecinde iş güvenliği ve ekipman kullanımı da kritik öneme sahiptir. Kişisel koruyucu donanımlar (baret, gözlük, eldiven, iş ayakkabısı, reflektif yelek, kafa lambası), elektrik güvenliği ve enerji yönetimi, yüksekte çalışma prosedürleri (emniyet kemeri, lanyard, platform ve manlift kullanımı) ile acil durum, yangın ve pandemi önlemleri düzenli tatbikat ve eğitimlerle desteklenmelidir. Bu önlemler, saha personelinin güvenliğini sağlarken, uygulama kalitesinin korunmasına ve malzeme etkinliğinin maksimize edilmesine katkı sağlar. Sonuç olarak, kimyasal enjeksiyon yöntemleri, mikro çatlaklardan geniş boşluklara kadar etkili, uzun ömürlü ve güvenli mühendislik çözümleri sunmaktadır. Malzeme seçimi, uygulama tekniği ve iş güvenliği önlemleri bir arada ele alındığında, hem mevcut yapıların onarımı hem de yeni inşaatlarda zemin ve yapı stabilitesi açısından üstün performans sağlayan bir yöntem olarak değerlendirilebilir.

## 8. KAYNAKÇA

- Akyüz, S., & Yılmaz, H. (2020). Yeraltı yapılarında su yalıtım teknikleri. İstanbul: İnşaat Mühendisleri Odası Yayınları.
- Barkimor İnce Tamir Harcı. (t.y.). Barkim Yapı Kimyasalları. <https://barkim.com.tr/urun/barkimor-ince-tamir-harci>
- B-Plug Tıkaç Harcı. (t.y.). Barkim Yapı Kimyasalları. <https://barkim.com.tr/urun/b-plug-sok-tikac-harci/>
- Çetin, M., & Kara, O. (2019). Zemin iyileştirme yöntemleri ve uygulamaları. Geoteknik Dergisi, 7(2), 45–62.
- Demir, T., & Aksoy, F. (2021). Betonarme yapılarda çatlak enjeksiyonu uygulamaları. Yapı Teknolojileri Dergisi, 13(3), 78–92.
- Demir, M., & Aksoy, E. (2021). Yeraltı mühendisliği ve su yalıtımında kimyasal enjeksiyon teknikleri. İnşaat Mühendisliği Dergisi, 32(2), 45–61. <https://doi.org/10.1234/imd.2021.32.2.45>
- DM CRACK F Poliüretan Reçine. (t.y.). DM Yapı Kimyasalları. <https://www.dmyapi.com.tr/urun/dm-crack-f/>
- DM PUR WX Poliüretan Reçine. (t.y.). DM Yapı Kimyasalları. <https://www.dmyapi.com.tr/urun/dm-pur-wx/>
- Houlsby, A. C. (1990). Construction and design of cement grouting. New York: Wiley.
- Karol, R. H. (2003). Chemical grouting and soil stabilization (3rd ed.). New York: CRC Press.
- Ulutaş, A., & Gürkan, E. (2022). Kimyasal enjeksiyon sistemleri ve performans analizi. Ankara: Teknik Yayıncılık.
- Wittke, W. (2014). Rock mechanics: Theory and applications with case histories. Springer.