

Haziran, 2026

# MÜHENDİSLİK ALANINDA TEORİ VE UYGULAMALAR

EDİTÖR

PROF. DR. ÖZLEM SALLI BİDECI

# **Mühendislik Alanında Teori ve Uygulamalar**

**Editör**

**Prof. Dr. Özlem Sallı Bideci**

**İmtiyaz Sahibi**  
Platanus Publishing®

**Editör**  
Prof. Dr. Özlem Sallı Bideci

**Kapak & Mizanpaj & Sosyal Medya**  
Platanus Yayın Grubu

**Birinci Basım**  
Haziran, 2026

**Yayımcı Sertifika No**  
45813

**ISBN**  
978-625-8514-85-1

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

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

**Telefon:** +90 312 390 1 118  
**web:** [www.platanuspublishing.com](http://www.platanuspublishing.com)  
**e-mail:** [platanuskita@gmail.com](mailto:platanuskita@gmail.com)



Platanus Publishing®

# İÇİNDEKİLER

|                                                                                                                                                                  |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>BÖLÜM 1.....</b>                                                                                                                                              | <b>7</b>   |
| <b>Firmaların Finansal Performansının Değerlendirilmesinde Kullanılan Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri</b>                                                    |            |
| Sıla Akbaba & Z. Figen Antmen & Meltem Manaşırılı                                                                                                                |            |
| <b>BÖLÜM 2.....</b>                                                                                                                                              | <b>39</b>  |
| <b>İstatistiki Sağlam Deney Tasarımı ve Sürdürülebilir Kalite Mühendisliği: Dinamik Taguchi Metodu ile Bir Uygulama</b>                                          |            |
| Saime Taphasanoğlu                                                                                                                                               |            |
| <b>BÖLÜM 3.....</b>                                                                                                                                              | <b>81</b>  |
| <b>Laboratuvar Ortamında Et Üretimi: Kültürlenmiş Etin Biyoteknolojik Temelleri, Üretim Süreci ve Gelecek Perspektifleri</b>                                     |            |
| Gencehan Karadağöğlu                                                                                                                                             |            |
| <b>BÖLÜM 4.....</b>                                                                                                                                              | <b>115</b> |
| <b>Kaynaktan Bardağa: İçme Sularında Mikroplastiklerin Taşınımı, Dönüşümü ve Sağlık Üzerine Etkileri</b>                                                         |            |
| Orhan Dağlıoğlu & Tuncay Gümüş                                                                                                                                   |            |
| <b>BÖLÜM 5.....</b>                                                                                                                                              | <b>159</b> |
| <b>Et Teknolojisinde Diyet Lifin Önemi</b>                                                                                                                       |            |
| Fadime Bayram & Sümeyra Sultan Tiske İnan                                                                                                                        |            |
| <b>BÖLÜM 6.....</b>                                                                                                                                              | <b>173</b> |
| <b>Isıl Sistemlerde Enerji Verimliliği: Temel İlkelerden Yenilenebilir Entegrasyona, Teknoloji, Strateji ve Politika Boyutlarıyla Kapsamlı Bir Değerlendirme</b> |            |
| Hakan Tutumlu                                                                                                                                                    |            |
| <b>BÖLÜM 7.....</b>                                                                                                                                              | <b>195</b> |
| <b>Geri Dönüştürülmüş Petg Filamentlerin Mekanik Özellikleri ve Katmanlı İmalatta Döngüsel Ekonomi</b>                                                           |            |
| Uçan Karakılınç                                                                                                                                                  |            |
| <b>BÖLÜM 8.....</b>                                                                                                                                              | <b>215</b> |
| <b>Bir Biyomalzeme Olarak Bakteriyel Selüloz</b>                                                                                                                 |            |
| Doğuhan Yalım & İlyas Kartal                                                                                                                                     |            |



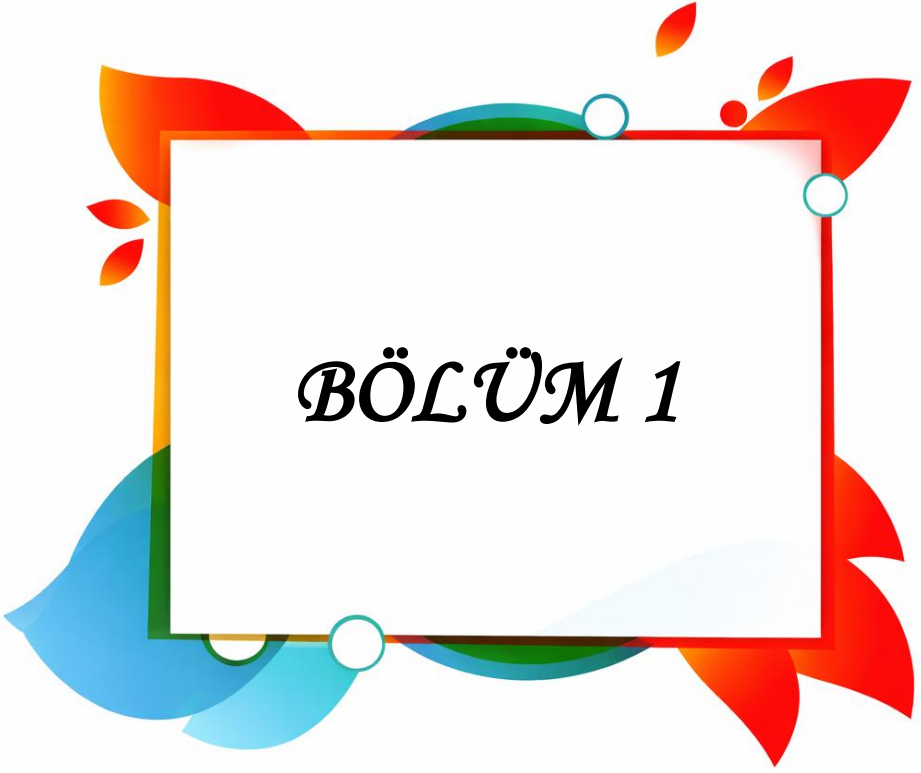
|                                                                                                                                       |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>BÖLÜM 9</b> .....                                                                                                                  | <b>233</b> |
| <b>Pomza, Perlit ve Zeolit Malzemelerinin Tekstil Sektöründe Kullanılabilirliğine Genel Bir Bakış</b>                                 |            |
| Nühket Şapıcı & Havva Tokgöz                                                                                                          |            |
| <b>BÖLÜM 10</b> .....                                                                                                                 | <b>243</b> |
| <b>İş Sağlığı ve Güvenliği ve Tehlikeli Madde Güvenlik Danışmanlığı Sektöründe Yapay Zekâ Entegrasyonu</b>                            |            |
| Arda Yılmaz                                                                                                                           |            |
| <b>BÖLÜM 11</b> .....                                                                                                                 | <b>257</b> |
| <b>Sürdürülebilir Kompozit Uygulamaları İçin Isırgan (<i>Urtica dioica</i> L.) Liflerinde Çürütme Yöntemlerinin Değerlendirilmesi</b> |            |
| Elif Sultan Akpınar                                                                                                                   |            |
| <b>BÖLÜM 12</b> .....                                                                                                                 | <b>283</b> |
| <b>Su Kıtlığıyla Mücadelede Küresel Çözüm Modellerinin Ankara ve Bursa Ölçeğinde Değerlendirilmesi</b>                                |            |
| Ahmet Emir Köse & Salim Serkan Nas & Sadullah Baydaroğlu                                                                              |            |
| <b>BÖLÜM 13</b> .....                                                                                                                 | <b>307</b> |
| <b>Su Kıtlığıyla Mücadelede Sürdürülebilir Çözüm Modelleri: Ülke Uygulamaları Üzerinden Karşılaştırmalı Bir İnceleme</b>              |            |
| Ahmet Emir Köse & Salim Serkan Nas & Sadullah Baydaroğlu                                                                              |            |
| <b>BÖLÜM 14</b> .....                                                                                                                 | <b>327</b> |
| <b>Kablo Askılı Beton Kutu Kirişli Köprülerde Yapısal Elemanlar, Tasarım İlkeleri ve Analiz Yöntemleri</b>                            |            |
| Şadiye Defne Akbaş                                                                                                                    |            |
| <b>BÖLÜM 15</b> .....                                                                                                                 | <b>335</b> |
| <b>Sanal Gerçeklikte Yapay Zekâ Destekli Etkileşim Tasarımı ve Bilişsel Yük</b>                                                       |            |
| Samet Alan                                                                                                                            |            |
| <b>BÖLÜM 16</b> .....                                                                                                                 | <b>347</b> |
| <b>Peynir Üretiminde Sürdürülebilir İnovatif Gelişmeler</b>                                                                           |            |
| Kübra Arslan Kardaş & Selda Bulca                                                                                                     |            |

**BÖLÜM 17.....367**

**Maden Yatakları Değerlendirmelerinde Demir Oksit İz Elementlerin  
Kullanıldığı Diskriminant Diagramları**

Dudu Kuru & Çiğdem Şahin Demir





# *BÖLÜM 1*

# Firmaların Finansal Performansının Değerlendirilmesinde Kullanılan Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri

*Sıla Akbaba<sup>1</sup> & Z. Figen Antmen<sup>2</sup> & Meltem Manaşırılı<sup>3</sup>*

## 1. Giriş

Küreselleşme ve bilgi teknolojilerindeki hızlı ilerlemeler, ülkeler arası sınırları bulanıklaştırırken işletmeler arasındaki rekabeti de her geçen gün yoğunlaştırmaktadır. Bu değişken pazar ortamında işletmelerin hayatta kalabilmeleri ve rekabet avantajı elde edebilmeleri, finansal durumlarını doğru analiz etmelerine ve performanslarını etkin bir şekilde değerlendirmelerine bağlıdır. Finansal performans ve Mali yapı; bir işletmenin varlıklarının ve kaynaklarının ne kadar verimli kullanıldığını ortaya koyarken, kârlılığı, likiditeyi ve operasyonel verimliliği yöneticiler, yatırımcılar, kreditorler ve politika yapıcılar için stratejik karar alma süreçlerinde hayati bilgiler sunmaktadır (Tazegül, 2025; Gönüllü, 2022).

Performans değerlendirmesinin yüksek önemine rağmen, rasyonel bir sıralama için doğru kriterlerin seçilmesi ve matematiksel yaklaşımların geliştirilmesi sürecin en kritik aşamasını oluşturmaktadır. Geleneksel analizlerin tek boyutlu kısıtlarını ve farklı finansal rasyoların birbiriyle çelişen sonuçlar üretebilme riskini aşmak amacıyla, literatürde Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu yöntemler, karmaşık finansal göstergeleri matematiksel bir temel üzerinde birleştirerek alternatifleri tek bir başarı skoru veya sıralamaya dönüştürme yeteneğine sahiptir (Gönüllü, 2022; Katrancı, 2025). Literatürde izlenen bu metodolojik süreç; likidite, finansal yapı, faaliyet ve kârlılık gibi ana başlıklardan uygun kriterlerin seçilmesi, ardından bu kriterlerin önem ağırlıklarının belirlenmesi ve son olarak firmaların bir sıralamaya tabi tutulması aşamalarından oluşmaktadır. Kriterlerin önem düzeylerini nesnel bir biçimde belirlemek için Entropi, CRITIC, MEREC,

<sup>1</sup> Yüksek Lisans, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, ORCID: 0009-0001-7331-513X

<sup>2</sup> Doç. Dr., Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0001-8475-1300

<sup>3</sup> Prof. Dr., Çukurova Üniversitesi, Su Ürünleri Fakültesi, Temel Bilimler Bölümü, ORCID: 0000-0002-0164-6693

ITARA, SIWEC, LODECI ve NMV gibi veriye dayalı ağırlıklandırma yöntemleri kullanılırken; firmaların nihai sıralaması için MARCOS, MOORA, COBRA, CoCoSo, TOPSIS, MABAC ve ARAS gibi ileri düzey algoritmalar ön plana çıkmaktadır. Bu yöntemlerin entegre kullanımı, analizlerin karar vericinin öznel yargılarından bağımsız, daha güvenilir, tutarlı ve şeffaf sonuçlar üretmesini sağlayarak finansal karar destek sistemlerine güçlü çözüm önerileri sunmaktadır (Gönüllü, 2022).

Özellikle ana metal sanayisinde, sektördeki rakipler arasında konumun belirlenmesi ve kaynakların verimli alanlara yönlendirilmesi açısından kritik bir rol oynamaktadır. Yapılan çalışmalar, bu ileri düzey metodolojilerin sadece geçmiş başarıyı ölçmekle kalmayıp, aynı zamanda geleceğe yönelik planlama, risk yönetimi ve sürdürülebilir büyüme stratejileri için de temel bir zemin oluşturduğunu kanıtlamaktadır (Tazegül, 2025; Gönüllü, 2022).

Sonuç olarak çalışma, kriterlerin objektif olarak ağırlıklandırılması ve alternatiflerin net bir biçimde sıralanması süreçlerini sentezleyerek, karmaşık finansal veri setlerinden anlamlı sonuçlar elde etmenin yollarını ortaya koymaktadır. Bu yönüyle çalışma, karar vericilere stratejik bir yol haritası sunarken, ÇKKV literatürüne metodolojik bir katkı sağlamayı ve finansal analiz süreçlerinde şeffaflığı artırmayı hedeflemektedir. Çalışmanın devam eden bölümünde ÇKKV yöntemleri teorik olarak anlatılıp, ardından kapsamlı bir literatür değerlemesi sunulmuştur.

## **2. Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) Yöntemleri**

ÇKKV yöntemleri, karar vericilerin birbiriyle çelişen birden fazla kriter altında en uygun alternatifi seçmelerine, seçenekleri sıralamalarına veya sınıflandırmalarına olanak tanıyan analitik araçlardır. Literatürde bu yöntemler, kesin verilerin kullanıldığı klasik modeller ve belirsizlik durumlarını yönetmek için geliştirilen bulanık (fuzzy) modeller olarak iki ana kolda incelenmektedir (Yavuz, Öztel ve Öz, 2020; Özbek, 2019)

### **2.1. Ağırlıklandırma ve Temel Sıralama Yöntemleri**

Karar verme sürecinin başlangıcında, kriterlerin nihai performans üzerindeki etkisini belirlemek için kullanılan bu teknikler, genellikle pratik ve anlaşılır bir yapıya sahiptir (Özbek, 2019). Bu yöntemlere örnek olarak; Basit Toplam Ağırlıklandırma (SAW/BTA), Ağırlıklı Çarpım Yöntemi (WPM/AÇY), SWARA, ARAS, CRITIC, ENTROPİ, MEREC, LOPCOW, WASPAS, Standart Sapma (SD) ve NMV (Normalize Edilmiş Maksimum Değerler) verilebilir.

## **2.2. Hiyerarşik ve İlişkisel Analiz Yöntemleri**

Karmaşık problemleri hiyerarşik bir düzende modelleyen veya kriterler arasındaki etkileşimli ağ yapılarını inceleyen yöntemlerdir (Özbek, 2019). Bu yöntemlere örnek olarak; Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP/AHS), Analitik Ağ Süreci (AAS/ANP), Gri İlişkisel Analiz (GİA/GRA), DEMATEL ve PROMETHEE verilebilir.

## **2.3. Uzlaşık Çözüm ve İdeal Nokta Bazlı Yöntemler**

Bu kategorideki yöntemler, seçilen alternatifin "en iyi" noktaya yakınlığı ve "en kötü" noktadan uzaklığı prensibiyle çalışır (Özbek, 2019). Bu yöntemlere örnek olarak; TOPSIS, VIKOR, EDAS, MABAC, MARCOS, MAIRCA ve RSMVC verilebilir.

## **2.4. Operasyonel ve Verimlilik Odaklı Yöntemler**

İşletmelerin operasyonel verimliliklerini, kaynak kullanım etkinliklerini ve çok amaçlı optimizasyonlarını ölçen modellerdir (Özbek, 2019). Bu yöntemlere örnek olarak; MOORA, MULTIMOORA, COPRAS, WASPAS, OCRA, Veri Zarflama Analizi (VZA) ve COBRA verilebilir.

## **2.5. Bulanık (Fuzzy) ÇKKV Yöntemleri**

Gerçek hayattaki kararların çoğunlukla dilsel ifadeler, insan sezgisi ve belirsizlik içermesi nedeniyle, kesin (crisp) sayıların yetersiz kaldığı durumlarda, Bulanık AHP (FAHP), Bulanık VIKOR, Bulanık TOPSIS, Sezgisel Bulanık Mantık ve HFLTS gibi modeller tercih edilir (Çakır, 2016).

Yukarıda detaylandırılan ÇKKV yöntemleri, işletmelerin finansal tablolarından elde edilen verileri objektif ve matematiksel birer başarı skoruna dönüştürmek amacıyla finansal analiz süreçlerinde kritik birer araç olarak kullanılmaktadır (Gönüllü, 2022). Bir sonraki bölümde sektörel bazlı literatür taraması verilmiştir.

## **3. Literatür Taraması**

**Finansal performans** konusunda, literatürdeki çalışmalar, ekonomik dinamiklere ve risk yapılarına göre belirli kategorilere ayrılmıştır.

### **3.1. Sanayi, Üretim ve Stratejik Kaynaklar Sektörü**

Literatürdeki çalışmalar, ekonomik dinamiklere ve risk yapılarına göre belirli kategorilere ayrılmıştır. Sanayi ve üretim odaklı sektörler, bir ülkenin ekonomik kalkınmasında lokomotif görevi gören, yüksek sermaye yatırımı ve istihdam kapasitesine sahip alanlardır. İmalat sanayii, ülke ihracatının ve üretiminin büyük bir kısmını karşılayarak dış ticaret dengesinde ve toplumun sosyo-ekonomik yaşam kalitesinde kritik bir rol oynamaktadır (Çilek, Şeyranlıoğlu ve Konuş,

2025; Gönüllü, 2022). Enerji sektörü ise sanayi üretimi ve teknolojik gelişmenin sürdürülebilirliği için stratejik bir kaynak niteliği taşıırken; inşaat ve altyapı faaliyetleri toplumsal refahın ve kentsel gelişimin temelini oluşturmaktadır (Akgün, 2022; Şahin ve Karacan, 2019).

Bu sektörlerdeki firmaların finansal performanslarının değerlendirilmesi, sadece yöneticiler için değil, aynı zamanda politika yapıcılar, yatırımcılar ve kreditorler için de büyük önem arz etmektedir (Akbulut ve Rençber, 2015; Çilek vd., 2025). Finansal performansın; kârlılık, likidite, borç ödeme gücü ve varlık kullanım verimliliği gibi çok sayıda çelişen kriteri barındıran karmaşık yapısı, ÇKKV yöntemlerinin finansal analizlerde objektif birer araç olarak kullanımını ön plana çıkarmıştır. Literatürde, özellikle demir-çelik, çimento ve otomotiv gibi imalat kollarında faaliyet gösteren işletmelerin sektör içindeki konumlarını belirlemek ve fırtınalı ekonomik dönemlerdeki dayanıklılıklarını ölçmek amacıyla bu yöntemlerden sıklıkla yararlanılmaktadır (Arslan ve Keskin, 2025; Gönüllü, 2020). Sanayinin sürdürülebilirliği için hayati olan kaynak yönetimini değerlendirmektedir (Karaoğlu ve Şahin, 2018).

### 3.1.1. İmalat, İnşaat, Metal ve Taş-Toprak Sektörleri Çalışmaları

İmalat ve ağır sanayi kollarında finansal performans; operasyonel verimlilik, kârlılık ve kaynakların ne derece etkin kullanıldığı üzerinden şekillenmektedir. Türk sanayisinin temelini oluşturan ana metal ve çimento gibi alanlarda firmaların rekabet konumunun belirlenmesi yatırımcı kararlarını doğrudan etkilerken, inşaat sektöründe artan firma sayısı ve yoğun rekabet, işletmelerin finansal sağlamlıklarının ÇKKV yöntemleriyle saptanmasını zorunlu kılmaktadır (Gönüllü, 2022; Hacıfettahoğlu ve Perçin, 2020; Akbulut ve Rençber, 2015). Tablo 1’de bu sektörde yer alan çalışmalar anlatılmaktadır.

**Tablo 1:** İmalat, İnşaat, Metal ve Taş-Toprak Sektörleri Çalışmaları

| Yazar ve Yıl                     | Çalışmanın Amacı ve Bulguları (Özet)                                                                                                                                                                                                                                                               |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Moghimi ve Anvari (2014)</b>  | Tahran Menkul Kıymetler Borsası'nda faaliyet gösteren sekiz İranlı çimento şirketinin finansal performanslarını analiz ederek Kriter ağırlıkları Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (FAHP) ile saptanmış ve şirketlerin genel finansal başarı grafiği TOPSIS tekniğiyle analiz edilmiştir.          |
| <b>Akbulut ve Rençber (2015)</b> | BİST’ de işlem gören imalat sektöründeki 32 işletmenin 2010-2012 dönemine ait finansal performansları ölçülmüş ve 10 adet finansal değişken dikkate alınarak TOPSIS yöntemiyle performans skorları elde edilerek sonuçlar şirketlerin pazar değeri/defter değeri oranları ile karşılaştırılmıştır. |
| <b>Güleç ve Özkan (2018)</b>     | Çalışmada, 16 çimento şirketinin 11 yıllık finansal performans sıralamaları Gri İlişkisel Analiz ile belirlenmiş ve bu sonuçların hisse senedi getirileriyle olan ilişkisi analiz edilmiştir.                                                                                                      |



|                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Lam, Liew ve Lam (2019)</b>                            | Malezya'da faaliyet gösteren inşaat şirketlerinin finansal performans düzeylerini belirlemek için finansal göstergenin ağırlıkları Entropi yöntemi ile belirlenmiş ve başarı sıralaması TOPSIS yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.                                                                                                                |
| <b>Şahin ve Karacan (2019)</b>                            | BİST' de faaliyet gösteren sekiz inşaat işletmesinin 2017 yılı mali tablo verileri 19 kriter üzerinden sıralanmış, performans dereceleri GİA ve TOPSIS yöntemleri kullanılarak analiz edilmiş ve yöntemlerin sonuçları arasındaki tutarlılık incelenmiştir.                                                                                     |
| <b>Çanakçıoğlu ve Küçükönder (2020b)</b>                  | BIST Taş ve Toprak Endeksi'ndeki on beş çimento işletmesinin 1999-2018 dönemi finansal performans ve etkinliklerinin aşamalı bir yaklaşımla incelenmesi amaçlanmıştır. Kriter ağırlıkları Entropi, performans skorları OCRA yöntemiyle belirlenmiş; işletmelerin göreceli etkinlikleri ise Veri Zarflama Analizi (VZA) ile karşılaştırılmıştır. |
| <b>Hacıfettahoğlu ve Perçin (2020)</b>                    | BİST İnşaat Endeksi'nde işlem gören yedi firmanın Entropi yöntemiyle 15 kriterinin ağırlığı saptanmış, şirketlerin başarı sıralamaları TOPSIS ve VIKOR ile yapılmış ve Borda kuralı ile nihai bir sıralamaya dönüştürülmüştür                                                                                                                   |
| <b>Gök Kısa ve Perçin (2020)</b>                          | Türkiye imalat sanayindeki sekiz alt sektörden 171 işletmenin performansı; Bulanık AHS ile ağırlıklandırılan 20 kriter, TOPSIS, VIKOR ve GİA yöntemleriyle analiz edilmiş ve sonuçlar Borda Sayım tekniğiyle kapsamlı bir şekilde ölçülmüştür.                                                                                                  |
| <b>Baydaş ve Eren (2021)</b>                              | Borsa İstanbul imalat-metal eşya alt sektöründeki 25 firmanın 2015-2019 yılları arasındaki finansal performans sıralamaları, gerçek hisse senedi getirileri arasındaki ilişkinin korelasyon analiziyle incelenerek hangi yöntemin daha başarılı olduğu saptanmıştır.                                                                            |
| <b>Çakalı ve Baloğlu (2022)</b>                           | BİST İmalat sektörüne ait yedi alt sektörün üç yıllık kârlılık performansları; kriterlerin CRITIC ve Entropi ile ağırlıklandırılıp sektörlerin VIKOR ve TOPSIS yöntemleriyle sıralanması ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.                                                                                                          |
| <b>Gönüllü (2022)</b>                                     | Türk ana metal sanayi şirketlerinin COVID-19 dönemindeki finansal performanslarını değerlendirmek ve pandeminin sektörel etkilerini gözlemlemek amaçlanmıştır. Kriterler Entropi yöntemiyle ağırlıklandırılmış ve 20 şirketin başarı sıralamaları ise MARCOS yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.                                         |
| <b>Agrawal, Agarwal, Agrawal, Pandey ve Kumari (2024)</b> | Hindistan imalat sanayisindeki şirketlerin rekabet gücünü ortaya koymak amacıyla göstergelerin önem ağırlıkları Bulanık SWARA yöntemiyle hesaplanmış, şirketlerin başarı sıralamaları ise Bulanık MOORA yöntemi aracılığıyla yapılmıştır.                                                                                                       |
| <b>Güçlü ve Muzaç (2024)</b>                              | BIST Temel Metal Endüstrisi Endeksi'ndeki ham demir ve çelik üretimi gerçekleştiren işletmelerin 2017-2021 yılları arasındaki finansal performansları Gri MULTIMOORA yöntemiyle analiz edilerek 10 temel rasyonun sıralama sonuçları, Copeland yöntemi ile nihai bir başarı grafiğinde toplulaştırılmıştır.                                     |
| <b>Arslan ve Keskin (2025)</b>                            | BİST 100 İmalat Sanayi Taş ve Toprağa Bağlı Alt Sektöründe yer alan firmaların 2023 yılına ait performansları Entropi yöntemiyle hesaplanmıştır. Sektörel başarı sıralamaları ise                                                                                                                                                               |

|                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                       | MOORA yönteminin farklı teknikleri kullanılarak analiz edilmiştir.                                                                                                                                                                                                |
| <b>Çilek vd. (2025)</b>               | BİST Ana Metal Sanayi Sektöründeki 27 şirketin 2020-2023 dönemi kârlılık performansları; LOPCOW yöntemiyle ağırlıklandırılan beş kriterin RSMVC yöntemiyle analiz edilerek yıllık başarı sıralamalarına dönüştürülmesi ile ölçülmüş ve yorumlanmıştır.            |
| <b>Vatansever ve Bayraktar (2025)</b> | BİST Katılım Sürdürülebilirlik Endeksi'nde yer alan 13 imalat şirketinin 2018-2023 dönemi finansal performansları, seçilen 8 kriterin önem ağırlıkları MEREC yöntemiyle belirlenmiş ve şirketlerin performans skorları COBRA yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. |

### 3.1.2. Kimya, Petrol ve Plastik Sektörü Çalışmaları

Yüksek katma değer sağlayan kimya, petrol ve plastik sektörü, tüketici mallarından temel kimyasallara kadar geniş bir yelpazede ülke ekonomisi için hayati önem taşımaktadır. Sektördeki işletmelerin finansal performanslarını etkileyen faktörlerin çokluğu ve çeşitliliği, karar vericilerin geleceğe yönelik stratejilerini belirlerken ÇKKV araçlarını kullanmalarını gerekli hale getirmiştir. Bu yöntemler, karmaşık mali tabloları yorumlayarak hem kârlılığı hem de likidite dengesini bütüncül bir yaklaşımla ortaya koymaktadır (Karaoğlu ve Şahin, 2018; Yavuz vd., 2020). Tablo 2'de bu sektörde yer alan çalışmalar anlatılmaktadır.

**Tablo 2:** Kimya, Petrol ve Plastik Sektörü Çalışmaları

| Yazar ve Yıl                    | Çalışmanın Amacı ve Bulguları (Özet)                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Öztürk ve Özçelik (2015)</b> | BİST kimya, petrol ve plastik sektöründeki firmaların 2010-2012 yılları arasındaki finansal performansları analiz edilmiştir. Rasyolar Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) ile ağırlıklandırılarak şirketlerin başarı sıralamaları TOPSIS yöntemiyle yapılmıştır.                                                                          |
| <b>Karaoğlu ve Şahin (2018)</b> | Borsa İstanbul Kimya, Petrol, Plastik Endeksi'nde (XKMYA) yer alan 24 işletmenin finansal performansları, belirlenen 15 alt kriter üzerinden incelenmiştir. Kriterlerin önem ağırlıkları AHP yöntemiyle hesaplanmış; ardından işletmelerin başarı sıralaması VIKOR, TOPSIS, GRA ve MOORA yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. |
| <b>Yavuz vd. (2020)</b>         | Türk kimya sektörünün 2010-2016 yılları arasındaki finansal performansları, belirlenen 10 farklı finansal oran dikkate alınarak yıllara ve alt sektörler göre analiz edilmiştir. Uzman görüşleri doğrultusunda bu değişkenler Bulanık VIKOR yöntemiyle değerlendirilerek alt sektörlerin başarı sıralamaları saptanmıştır.             |

### 3.1.3. Enerji Sektörü Çalışmaları

Enerji sektörü, üretim süreçlerinin temel girdisi olması ve toplumsal refahı doğrudan etkilemesi nedeniyle günümüzde stratejik bir konuma sahiptir. Enerji

maliyetlerindeki artışlar ve küresel ekonomik dalgalanmalar, sektördeki şebekelerin ve şirketlerin finansal dayanıklılıklarını periyodik olarak ölçülmesini zorunlu kılmıştır. Sektörün çok boyutlu yapısı ve belirsizlikleri dikkate alındığında, ÇKKV modelleri enerji firmalarının finansal sağlıklarını izlemek için güvenilir birer navigasyon aracı işlevi görmektedir (Akgün, 2022; Taşçı ve Yurttadur, 2025). Tablo 3’te bu sektörde yer alan çalışmalar anlatılmaktadır.

**Tablo 3: Enerji Sektörü Çalışmaları**

| <b>Yazar ve Yıl</b>                          | <b>Çalışmanın Amacı ve Bulguları (Özet)</b>                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Metin, Yaman ve Korkmaz (2017)</b>        | BİST enerji firmalarının finansal performansları 10 temel finansal oran kullanılarak TOPSIS ve MOORA yöntemleriyle analiz edilmiş ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. İki yöntemin benzer sonuçlar ürettiği ve sektörel performansın ölçümünde tutarlı oldukları tespit edilmiştir. |
| <b>Bağcı ve Yüksel Yiğiter (2019)</b>        | BİST’ de işlem gören enerji firmalarının 2008-2017 dönemi finansal performansları 16 mali tablo kalemi üzerinden ölçülmüştür. Kriterlerin önceliklendirilmesinde SD, şirketlerin sıralanmasında ise WASPAS yöntemi kullanılmıştır.                                                             |
| <b>Orçun (2019)</b>                          | BIST Elektrik endeksindeki şirketlerin finansal başarı sıralamaları ile borsa getirileri arasındaki bağlantının tespiti hedeflenmiştir. Belirlenen 8 adet finansal rasyoların değerlendirilmesinde Entropi, performans sıralamasında ise WASPAS yöntemi kullanılmıştır.                        |
| <b>Ağ ve Kuloğlu (2020)</b>                  | BİST’ de işlem gören sekiz enerji işletmesinin 2019 yılı operasyonel etkinlikleri ve finansal performansları ölçülmüştür. Mali tablolardan derlenen veriler Veri Zarflama Analizi (VZA) ile değerlendirilerek görece başarılar saptanmıştır.                                                   |
| <b>Çiftçi ve Yıldırım (2020)</b>             | BIST enerji sektöründe faaliyet gösteren 6 işletmenin finansal etkinlikleri 20 finansal oran üzerinden incelenmiştir. İşletmelerin performans sıralaması, belirsizlikleri dikkate alan Gri Entropi ve Gri İlişkisel Analiz yöntemleriyle gerçekleştirilmiştir.                                 |
| <b>Karacıoğlu, Yalçın ve Gültekin (2020)</b> | Sekiz enerji şirketinin 2013-2017 yıllarına ait finansal performansları 5 ana ve 13 alt kriter üzerinden analiz edilmiştir. Belirlenen bu değişkenler Sezgisel Bulanık Mantık ve Entropi tabanlı bir modelle derecelendirilmiştir.                                                             |
| <b>Akgün (2022)</b>                          | BIST enerji şirketlerinin finansal performansları 13 finansal oran üzerinden çok kriterli bir yaklaşımla değerlendirilmiştir. Kriterlerin ağırlıkları CRITIC, işletmelerin performans sıralaması ise CODAS yöntemiyle hesaplanmıştır.                                                          |
| <b>Özdemir ve Parmaksız (2022)</b>           | BIST Enerji endeksindeki 16 işletmenin 2019-2020 dönemi finansal performansları 10 eşit ağırlıklı finansal oran kullanılarak değerlendirilmiştir. İşletmelerin başarı sıralamaları TOPSIS ve EDAS yöntemleri aracılığıyla elde edilmiştir.                                                     |
| <b>Madençoğlu, Ünlüsoy ve Yılmaz (2022)</b>  | Sekiz büyük enerji şirketinin 2016-2019 dönemi finansal performanslarını analiz etmek için yeni bir entegre model sunulmuştur. Kriter ağırlıkları Entropi, başarı sıralaması ise MABAC yöntemiyle belirlenmiştir.                                                                              |

|                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Aksu ve Geçer (2023)</b>              | BİST' deki enerji şirketlerinin finansal performansları, nakit yeterliliği ve nakit verimliliği boyutlarıyla COVID-19 döneminde incelenmiştir. Şirketlerin başarı sıralaması 7 adet nakit temelli oran üzerinden GIA yaklaşımıyla yapılmıştır.                     |
| <b>Kavas, Medetoğlu ve Öztürk (2023)</b> | BIST Elektrik, gaz ve buhar sektöründeki 8 işletmenin 2017-2021 yılları arasındaki finansal performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bilanço verilerinden elde edilen 8 finansal oran kullanılarak TOPSIS ve MOORA yöntemleriyle sıralama yapılmıştır. |
| <b>Yılmaz Özekenci (2024)</b>            | BIST enerji endeksi şirketlerinin 2022 yılı finansal başarı durumları hibrit ÇKKV yöntemleri kullanılarak araştırılmıştır. On üç rasyo LOPCOW ve CRITIC ile ağırlıklandırılmış, sıralama ise CoCoSo yöntemi ile yapılmıştır.                                       |
| <b>Taşçı ve Yurttadur (2025)</b>         | BİST Enerji sektöründeki firmaların finansal performansları ile hisse senedi getirileri arasındaki ilişki 2020-2024 dönemi için incelenmiştir. Kriterlerin ağırlıkları WENSLO yöntemiyle belirlenmiş ve şirketler ARAS yöntemiyle sıralanmıştır.                   |

### **3.2. Finansal Kuruluşlar ve Yatırım Hizmetleri Sektörü Üzerine Çalışmalar**

Finansal kuruluşlar, ekonomik sistemde tasarrufların yatırımlara dönüştürülmesini sağlayan köprü vazifesi görmektedir ve piyasa istikrarının korunmasında merkezi bir rol oynamaktadır. Sağlıklı bir ekonomik yapı için bu kurumların kaynaklarını ne derece verimli kullandıklarının ölçülmesi hem düzenleyici kurumlar hem de yatırımcılar açısından kritik bir gerekliliktir. Finansal piyasaların dinamik ve riskli doğası, bu kuruluşların performans değerlendirme süreçlerinde çok boyutlu analiz tekniklerinin kullanımını ön plana çıkarmıştır (Karahan ve Kızıkan, 2022; Köse ve Akıllı, 2021; Erdoğan, 2022). Bu başlık altında ayrıca, sürdürülebilirlik endeksi çalışmalar yer almaktadır.

#### **3.2.1. Bankacılık Sektörü Çalışmaları**

Bankacılık sektörü, finansal sistemin en dinamik ve geniş hacimli parçası olarak ekonominin yönünü belirleme gücüne sahiptir. Bankaların yönetim yeterliliği, aktif kalitesi ve sermaye yeterliliği gibi karmaşık boyutlarının değerlendirilmesi, sadece rasyolarla değil, bu rasyoları sentezleyen matematiksel modellerle mümkündür. ÇKKV yöntemleri, bankaların risklerini minimize etme ve kârlılıklarını optimize etme kabiliyetlerini bilimsel bir zeminde kıyaslama imkânı sunar (Erdoğan, 2022; Karahan ve Kızıkan, 2022; Gazel, Altınırnak ve Karamaşa, 2021). Tablo 4'te bu sektörde yer alan çalışmalar anlatılmaktadır.

**Tablo 4: Bankacılık Sektörü Çalışmaları**  
**Çalışmanın Amacı ve Bulguları (Özet)**

**Yazar ve Yıl**

**Çalışkan ve Eren  
(2016)**

2014 yılı sonundaki aktif büyüklükleri baz alınarak 20 kamusal, özel ve yabancı sermayeli mevduat bankalarının 2010-2014 dönemi finansal performansları 10 farklı rasyo üzerinden karşılaştırılmıştır. Kriter ağırlıkları AHP ile belirlenirken, bankaların başarı sıralaması PROMETHEE yöntemiyle yapılmıştır.

**Wanke, Azad,  
Barros ve Hassan  
(2016)**

24 farklı ülkede faaliyet gösteren 114 İslami bankanın etkinlik faktörleri ve 10 yıllık maliyet yapıları analiz edilmiştir. Bankaların performans ve verimlilik sıralaması TOPSIS ve yapay sinir ağları yöntemleri kullanılarak yapılmıştır.

**Akçakanat, Eren,  
Aksoy ve  
Ömürebek, (2017)**

Türk bankacılık sektöründeki kurumlar aktif büyüklüklerine göre kategorize edilerek finansal ve operasyonel kriterler üzerinden değerlendirilmiştir. Kriterlerin ağırlıkları Entropi ile hesaplanmış ve bankaların performans sıralamaları WASPAS yöntemiyle yapılmıştır.

**Akgül (2019)**

Türk bankacılık sisteminin 2010-2018 yılları arasındaki performansı 10 farklı gösterge üzerinden incelenmiştir. Kriterler Entropi ile ağırlıklandırılarak bankaların sıralamaları SAW, MAUT ve ARAS yöntemleriyle gerçekleştirilmiştir.

**Ayçin ve Orçun  
(2019)**

Türkiye'deki mevduat bankalarının 2016-2017 yılları arasındaki finansal performansları operasyonel kriterler üzerinden değerlendirilmiştir. Entropi yöntemiyle ağırlıklandırılan kriterler kullanılarak, bankaların finansal başarı sıralaması MAIRCA yöntemiyle yapılmıştır.

**Işık (2019)**

Türk mevduat bankacılığı sektörünün 2008-2017 dönemi performans değişimleri, sektörün genel sağlamlığını yansıtan finansal rasyolar üzerinden analiz edilmiştir. Kriter ağırlıkları Entropi ile belirlenmiş ve bankacılık sisteminin yıllık sıralaması ARAS yöntemiyle elde edilmiştir.

**Eren ve Çelik  
(2020)**

BİST 100 endeksindeki bankaların 2006-2019 dönemi mali durumları kârlılık, likidite ve sermaye yeterliliği gibi boyutlarla karşılaştırılmıştır. Finansal performans değerlemesi ve sektörel sıralama TOPSIS yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

**Kartal (2020)**

Türk bankacılık sektöründeki katılım bankalarının 2017-2018 yılları arası performansları kâr ve maliyet yönetimi kriterleri açısından analiz edilmiştir. Dokuz performans göstergesi üzerinden bankalar arasındaki sıralama VIKOR modeli ile yapılmıştır.

**Özkan (2020)**

Türkiye'deki 5 katılım bankasının 2016-2018 dönemi finansal sağlamlıkları, etkinlik ve verimlilik oranları dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Belirlenen kriterler ışığında bankalar, ideal çözüme yakınlıklarını ölçen TOPSIS yöntemiyle sıralanmıştır.

**Gazel vd. (2021)**

Türkiye'deki ticari bankaların 2007-2017 dönemi finansal performansları 34 farklı oran üzerinden analiz edilmiştir. Kriter ağırlıkları Bulanık Shannon Entropisi ile hesaplanmış ve nihai başarı sıralaması Bulanık TOPSIS yöntemiyle yapılmıştır.

**Erdoğan  
(2022)**

BİST' de işlem gören 9 mevduat bankasının 2016-2020 dönemi finansal performansı 11 kriter üzerinden ölçülmüştür. Ağırlıkları

|                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Karahan ve Kızıkan (2022)</b>                   | AHP ve SD yöntemlerinin entegrasyonu ile belirlenen bankaların performans skorları PIV yöntemiyle hesaplanmıştır. Türkiye'nin aktif büyüklüğüne göre en kârlı ilk beş bankasının finansal performansları 9 farklı kriterle karşılaştırılmıştır. Kriter ağırlıkları Entropi ile belirlenip, performans sıralamaları TOPSIS ve PROMETHEE yöntemleriyle elde edilmiştir. |
| <b>Demirci (2023)</b>                              | Türk bankacılık sektöründeki kamu, yerli özel ve yabancı bankaların beş yıllık yönetim yeterliliği performansları; kriterlerin Entropi yöntemiyle ağırlıklandırılıp banka gruplarının MARCOS yöntemiyle sıralanması yoluyla mülkiyet yapılarına göre analiz edilmiştir.                                                                                               |
| <b>Terzioğlu, Temelli, Yaşar ve Özdemir (2023)</b> | Dokuz kamu ve özel sermayeli bankanın finansal ve çevresel sürdürülebilirlik performansları sahiplik yapılarına göre karşılaştırılmıştır. Entropi ile ağırlıklandırılan 7 gösterge üzerinden bankaların performans sıralamaları MOORA, OCRA ve GİA yöntemleriyle analiz edilmiştir.                                                                                   |
| <b>Gülcemal ve İzci (2024)</b>                     | Türk katılım bankacılığı sektörünün 2021-2022 dönemi finansal performansı aktif ve öz kaynak kârlılığı gibi 6 kriter üzerinden ölçülmüştür. LOPCOW yöntemiyle ağırlıklandırılan kriterler kullanılarak, alternatif bankaların sıralaması MOOSRA yöntemiyle yapılmıştır.                                                                                               |
| <b>Öner ve Bağcı (2025)</b>                        | İslam İşbirliği Teşkilatı üyesi 13 ülkedeki İslami bankacılık sektörünün finansal performansı, NMV yöntemiyle ağırlıklandırılan sekiz kriterin TOPSIS yöntemiyle analiz edilmesine dayanmaktadır.                                                                                                                                                                     |
| <b>Samancı (2025)</b>                              | Türkiye'de faaliyet gösteren kamu ve özel sermayeli katılım bankalarının 2022 yılı finansal performansları 6 ana ve 18 alt kriter üzerinden değerlendirilmiştir. Bankaların başarı sıralamaları Gri İlişkisel Analiz (GİA) yöntemiyle yapılmıştır.                                                                                                                    |

### 3.2.2. Sigortacılık Sektörü Çalışmaları

Bireylerin ve kurumların gelecekte karşılaşılabileceği risklere karşı bir güvenlik tedbiri sunan sigortacılık sektörü, finansal sistem içindeki payını her geçen gün artırmaktadır. Sigorta şirketlerinin prim üretim etkinlikleri ve finansal sağlamlık durumları, birçok çelişen kriterin bir arada değerlendirilmesini gerektiren çok kriterli bir problem niteliğindedir. Bu noktada kullanılan analitik yöntemler, şirketlerin rekabet gücünü tespit ederek finansal piyasalardaki güven ortamının sürdürülmesine katkı sağlar (Bektaş, 2023; Gökdemir ve Emel, 2023; Ünal, 2019). Tablo 5'te bu sektörde yer alan çalışmalar anlatılmaktadır.

**Tablo 5: Sigortacılık Sektörü Çalışmaları**

| <b>Yazar ve Yıl</b>             | <b>Çalışmanın Amacı ve Bulguları (Özet)</b>                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Çakır (2016)</b>             | BİST Sigortacılık endeksine kayıtlı altı sigorta firmasının finansal sağlamlıkları, AHP yaklaşımıyla ağırlıklandırılan kriterler üzerinden incelenmiştir. İşletmelerin nihai başarı sıralaması ise VIKOR yöntemi kullanılarak elde edilmiştir.                                      |
| <b>Aytekin Karamaşa (2017)</b>  | ve BİST’ deki altı sigorta şirketinin 2011-2015 dönemi, belirsizlik ve eksik bilgi ortamı dikkate alınarak analiz edilmiştir. Kriterler Bulanık Shannon Entropisi ile ağırlıklandırılmış ve sıralamalar Bulanık TOPSIS yöntemiyle gerçekleştirilmiştir.                             |
| <b>Shen, Hu Tzeng (2017)</b>    | ve Bu çalışma Tayvan'daki sigorta şirketlerinin karmaşık finansal modellerini iyileştirmeyi amaçlamıştır. DRSA ve DANP ile ağırlıklandırılan kriterler, Bulanık İntegral yaklaşımıyla değerlendirilerek şirketlerin finansal performans teşhisleri yapılmıştır.                     |
| <b>Torbati ve Sayadi (2018)</b> | İran'daki 52 sigorta şubelerinin uzman görüşlerine dayalı çeşitli kriterler BWM yöntemiyle ağırlıklandırılırken, şubelerin başarı sıralaması Bulanık Çıkarım Sistemi (FIS) aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.                                                                       |
| <b>Acar (2019)</b>              | BIST Sigorta Endeksi’nde yedi sigorta şirketinin 2008-2017 dönemine ait finansal performansları 18 mali oran üzerinden ölçülmüş ve TOPSIS yöntemi aracılığıyla tek bir skora dönüştürülerek şirketlerin başarı sıralamaları saptanmıştır.                                           |
| <b>Aydın (2019)</b>             | Türkiye’de faaliyet gösteren hayat ve emeklilik sigorta şirketlerinin 2015-2017 yılları arasındaki sektörel performanslarını ölçmek için 10 finansal ve 8 teknik oran kriter olarak saptanmış; CRITIC ve TOPSIS yöntemleri ile başarı grafiği incelenmiştir.                        |
| <b>Ünal (2019)</b>              | BİST Sigorta Endeksi’ndeki şirketlerin 2018 yılına ait dört çeyreklik performansları, sekiz kriterin Entropi ile ağırlıklandırılıp EDAS yöntemiyle analiz edilmesi sonucunda dönemlik başarı sıralamaları belirlenmiştir.                                                           |
| <b>Dwivedi (2021)</b>           | vd. Hindistan'daki bir sigorta şirketinin finansal ve müşteri odaklı göstergelerini temel alan kurumsal vizyon ve stratejileri analiz edilmiştir. Kurumsal Karne (BSC) yaklaşımıyla belirlenen değişkenler BWM yöntemiyle ölçülerek şirketin gelişimi değerlendirilmiştir.          |
| <b>Ünal ve Taşçı (2022)</b>     | Türkiye’deki katılım sigortacılığı sektörünün 2021 yılı 4 çeyrek dönem finansal performansları hibrit bir yaklaşımla ölçülmüştür. SD yöntemiyle ağırlıklandırılan kriterler, WASPAS yöntemi kullanılarak analiz edilmiş ve şirketler sıralanmıştır.                                 |
| <b>Pala (2022a)</b>             | BIST Sigorta Endeksi firmalarının 2019-2020 yıllarındaki finansal başarı düzeyleri sekiz kriter üzerinden analiz edilmiştir. Kriterler CRITIC yöntemiyle önceliklendirilmiş ve çoklu sıralama yaklaşımlarını birleştiren MULTIMOOSRAL yöntemiyle nihai sıralamalar elde edilmiştir. |
| <b>Bektaş (2023)</b>            | BIST sigortacılık (XSGRT) endeksinde bulunan şirketlerin 2021 yılı finansal performanslarının dört çeyrek dönemi kapsayacak şekilde değerlendirilmiştir. MEREC yöntemiyle                                                                                                           |

|                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                | <p>ağırlıklandırılan sekiz kriter, MABAC ve CoCoSo yöntemleri aracılığıyla analiz edilerek dönemsel başarı sıralamaları yapılmıştır.</p>                                                                                                                                                |
| <b>Gökdemir ve Emel (2023)</b> | <p>BİST’ de faaliyet gösteren altı sigorta şirketinin 2020-2022 dönemindeki finansal gelişimleri yedi temel göstergeyle incelenmiştir. Bu kapsamda CRITIC temelli PROMETHEE II hibrit yöntemi kullanılarak şirketlerin sektör içi performans sıralamaları elde edilmiştir.</p>          |
| <b>Katı (2025)</b>             | <p>BIST’te işlem gören sigorta şirketlerinin 2013-2023 dönemi geniş zamanlı finansal performansları sekiz kriter üzerinden değerlendirilmiştir. Kriter ağırlıkları İstatistiksel Varyans (SV) yöntemiyle saptanmış ve EDAS yöntemi kullanılarak performans skorları hesaplanmıştır.</p> |

### 3.2.3. Aracı Kurumlar ve Menkul Kıymet Yatırım Ortaklıkları Çalışmaları

Sermaye piyasalarının gelişmesinde kilit rol oynayan aracı kurumlar ve yatırım ortaklıkları, tasarruf sahiplerinin birikimlerini şeffaf bir ortamda yönlendirmelerine aracılık eder. Yatırımcıların ve paydaşların rasyonel kararlar alabilmesi için bu kurumların finansal performanslarının nesnel verilere dayalı olarak sıralanması büyük önem taşımaktadır. ÇKKV yaklaşımları, piyasa çarpanlarını ve mali yapı göstergelerini tek bir performans skoruna dönüştürerek şeffaflığı artırmaktadır (Ayçin, 2018; Pala, 2022; Medetoğlu, 2024). Tablo 6’da bu sektörde yer alan çalışmalar anlatılmaktadır.

**Tablo 6:** Aracı Kurumlar ve Menkul Kıymet Yatırım Ortaklıkları Çalışmaları

| <b>Yazar ve Yıl</b>          | <b>Çalışmanın Amacı ve Bulguları (Özet)</b>                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Günay ve Kaya (2017)</b>  | BİST’ te işlem gören beş aracı kurumun 2014-2015 dönemi finansal performansları 11 rasyo üzerinden karşılaştırılmıştır. Kurumların başarı sıralamaları ELECTRE, ORESTE ve TOPSIS yöntemlerinin bütünsel kullanımıyla elde edilmiştir.                                              |
| <b>Ayçin (2018)</b>          | BİST’te işlem gören 9 menkul kıymet yatırım ortaklığının finansal performansı piyasa bazlı 7 kriter üzerinden değerlendirilmiştir. Entropi ile ağırlıklandırılan kriterler kullanılarak işletmelerin başarı sıralaması Gri İlişkisel Analiz (GİA) yöntemiyle yapılmıştır.          |
| <b>Köse ve Akıllı (2021)</b> | Türk finans sektöründeki aracı kurumların 2016-2019 dönemi finansal performans düzeyleri 10 farklı rasyo üzerinden ölçülmüştür. Uzman görüşüyle ağırlıklandırılan kriterler kullanılarak firmaların yıllık başarı sıralamaları VIKOR yöntemiyle belirlenmiştir.                    |
| <b>Pala (2022b)</b>          | BIST Aracı Kurum endeksindeki şirketlerin 2021 yılı finansal performansları ve sektördeki konumları 8 farklı rasyo ile analiz edilmiştir. Kriterler İMV yöntemiyle nesnel olarak ağırlıklandırılmış ve şirketlerin başarı sıralamaları WASPAS yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. |
| <b>Zadeh ve Zarch (2024)</b> | Tahran Menkul Kıymetler Borsası’nda işlem gören seksen şirketin kurumsal stratejilerinin finansal performans ve yatırımcı                                                                                                                                                          |



**Medetoğlu  
(2024)**

davranışları üzerindeki etkisi incelenmiştir. D-CRITIC yöntemiyle ağırlıklandırılan 8 kriter üzerinden stratejilerin nihai performans sıralaması bulanık MULTI-MOORA yöntemiyle yapılmıştır. BIST Aracı Kurumlar sektöründeki altı işletmenin 2022-2023 yılları finansal başarıları 5 temel oran üzerinden analiz edilmiştir. Kriter ağırlıkları Entropi ile hesaplanmış ve finansal performans sıralaması VIKOR ve TOPSIS yöntemleriyle elde edilmiştir.

### **3.2.4. Sürdürülebilirlik Endeksi Bağlamında Finansal Performans Çalışmaları**

Sürdürülebilirlik endeksleri, firmaların sadece finansal değil, aynı zamanda çevresel ve sosyal sorumluluklarını da kurumsal yönetimle ne derece harmanladıklarını gösteren platformlardır. Bu endeksteeki şirketlerin finansal başarılarının ölçülmesi, kurumsal sürdürülebilirlik yatırımlarının mali yapıyla olan dengesini anlamlandırmayı sağlar. ÇKKV teknikleri, sürdürülebilir mali yapı kurmayı hedefleyen şirketler için birer kıyaslama aracı olarak kullanılabilir (Kaya vd., 2024; Dağıstanlı, 2023; Kınalı, 2025). Tablo 7’de bu sektörde yer alan çalışmalar anlatılmaktadır.

**Tablo 7:** Sürdürülebilirlik Endeksi Bağlamında Finansal Performans Çalışmaları

| <b>Yazar ve Yıl</b>                             | <b>Çalışmanın Amacı ve Bulguları (Özet)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Dağıstanlı (2023)</b>                        | BIST Sürdürülebilirlik endeksindeki enerji şirketlerinin 2014-2021 dönemi finansal performans ve muhasebe eğilimlerinin tespiti amaçlanmıştır. İşletmelerin başarı durumları, HFTOPSIS yöntemi ve trend analizi yaklaşımı kullanılarak değerlendirilmiştir.                                                                                                                                                           |
| <b>Kartal, Özdil ve Acar Karaboğa (2024)</b>    | BIST Sürdürülebilirlik endeksindeki 25 firmanın 2014-2022 dönemi finansal performansları kârlılık ve verimlilik temelinde incelenmiştir. CRITIC yöntemiyle ağırlıklandırılan 5 kriter, COCOSO ve EDAS yöntemleri kullanılarak analiz edilmiş ve şirketlerin yıllık sıralamaları elde edilmiştir.                                                                                                                      |
| <b>Kaya, Pamucar, Gürler ve Özcalici (2024)</b> | BİST Sürdürülebilirlik Endeksi’nde (bankalar hariç) yer alan şirketlerin finansal performansları, uzman görüşlerine dayalı dokuz gösterge üzerinden kapsamlı bir modelle sıralanmıştır. FUCOM (Tam tutarlılık yöntemi) yöntemiyle belirlenen ağırlıklar kullanılarak dokuz farklı ÇKKV yönteminin (CoCoSo, GRA, MABAC, MAIRCA, MOOSRA, OCRA, TOPSIS, TODIM, VIKOR) sonuçları Copeland tekniğiyle bütünleştirilmiştir. |
| <b>Kınalı (2025)</b>                            | BİST Sürdürülebilirlik Katılım Endeksi’ndeki şirketlerin finansal yapı performansları eşit ağırlıklı sekiz oran üzerinden analiz edilmiştir (tüm kriterlere eşit ağırlık verilmiştir). İşletmelerin sürdürülebilir mali yapı başarı sıralamaları MABAC yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.                                                                                                                     |

**Yalçın, Kara ve Özyürek, 2025 (2025)** BİST Sürdürülebilirlik Endeksi'ndeki en büyük on şirketin 2023 yılı finansal performansları ve sektördeki rekabetçi konumları değerlendirilmiştir. Seçilen on iki kriter CRITIC yöntemiyle ağırlıklandırılarak, şirketlerin başarı sıralaması MABAC yöntemi ile saptanmıştır.

### 3.3. Hizmet, Ticaret ve Teknoloji Sektörü Üzerine Çalışmalar

Bu kategoride bir araya getirilen perakende, lojistik, turizm ve teknoloji gibi sektörler, modern ekonominin dinamizmini yansıtmaktadır. Genellikle daha az sermaye yoğun, insan odaklı, inovasyona dayalı ve doğrudan tüketiciye dokunan yapılarıyla öne çıkan bu sektörlerde finansal performans, geleneksel ölçütlerin ötesine geçer. Marka değeri, müşteri memnuniyeti, pazar payı ve teknolojik adaptasyon yeteneği gibi maddi olmayan varlıklar, finansal sonuçlarla yakından ilişkilidir. Dolayısıyla, bu alandaki performans değerlendirmeleri, pazar trendlerini, tüketici davranışlarını ve rekabet avantajı yaratan yenilikçi stratejileri anlamak için kritik birer araçtır (Gül ve Erdem, 2022; Batır, 2022; Katrancı, 2025).

#### 3.3.1. Gıda, İçecek ve Perakende Sektörü Çalışmaları

Gıda sektörü, temel ihtiyaçları karşılaması ve arz-talep dalgalanmalarına olan duyarlılığı nedeniyle stratejik öneme sahip bir alandır. Özellikle perakende ticaret zincirlerinin stok devir hızları ve kârlılık marjları, finansal sağlığın en kritik belirleyicileri olarak kabul edilmektedir. Sektördeki yoğun rekabet ve değişken maliyet yapıları, firmaların durumlarını rakipleriyle kıyaslamak için ÇKKV yöntemlerine sıklıkla başvurulmasına neden olmuştur (Uygurtürk ve Abdullayev, 2025; Pala, 2023; Batır, 2022). Tablo 8'de bu sektörde yer alan çalışmalar anlatılmaktadır.

**Tablo 8:** Gıda, İçecek ve Perakende Sektörü Çalışmaları

| Yazar ve Yıl                             | Çalışmanın Amacı ve Bulguları (Özet)                                                                                                                                                                                                                                  |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Meydan, Yıldırım ve Senger (2016)</b> | BIST' te işlem gören ve 2012 yılında kâr eden 10 gıda işletmesinin performansını bütüncül bir yaklaşımla analiz edilmiştir. İşletmelerin likidite, mali yapı ve kârlılık rasyoları üzerinden yapılan bu değerlendirmede Gri İlişkisel Analiz kullanılmıştır.          |
| <b>Kaya ve Çoşkun (2016)</b>             | BIST gıda, içki ve tütün sektöründeki 17 işletmenin 2009-2013 yılları arasındaki verimlilik düzeyleri VZA ile ölçülmüştür. Satış artışı, sermaye yapısı ve kâr oranları gibi kriterler üzerinden sektörün kriz sonrası verimliliğini korumaya çalıştığı saptanmıştır. |
| <b>Ömürbek ve Eren (2016)</b>            | Gıda sektöründe önemli bir yere sahip olan bir firmanın 2005-2014 dönemindeki on yıllık finansal seyri likidite, kârlılık ve devir hızı oranlarının kullanılarak PROMETHEE, MOORA ve COPRAS yöntemleriyle incelenmiştir.                                              |

|                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Özbek (2016)</b>                      | BİST' te işlem gören BİM mağazalar zincirinin 2008-2015 yılları arasındaki finansal gelişimi mercek altına alınmıştır. ELECTRE III yöntemiyle 2009 ve 2010 yılları en verimli dönemler olarak belirlenirken, 2014 yılının beklentilerin altında kaldığı görülmüştür.                                       |
| <b>Alimohammadlou ve Bonyani (2017)</b>  | İran gıda endüstrisindeki en büyük 14 şirketin finansal performansları, likidite ve kârlılık rasyoları temel alınarak değerlendirilmiştir. En iyi-En kötü yöntemi (BWM) ve PROMETHEE II yöntemleri entegre edilerek işletmelerin sektördeki rekabetçi konumları saptanmıştır.                              |
| <b>Maya ve Eren (2018)</b>               | Türk gıda sektöründe 2014 yılında en büyük 1000 sanayi kuruluşu arasına giren 12 işletmenin 2011-2015 verileri 10 kriter üzerinden karşılaştırılmıştır. Belirlenen değişkenler AHP, TOPSIS ve VIKOR yöntemleri aracılığıyla işlenerek her yıl için en başarılı şirketler belirlenmiştir.                   |
| <b>Yıldırım, Altan ve Gemici (2018)</b>  | BİST Kurumsal Yönetim Endeksi'ndeki 5 gıda ve içecek şirketinin 2013-2016 dönemi finansal performansı dokuz finansal oran üzerinden incelenmiştir. Kriter ağırlıkları Entropi ile belirlenerek şirketlerin başarı sıralaması TOPSIS yöntemiyle gerçekleştirilmiştir.                                       |
| <b>Hoe, Siew, Fai, Xin ve Fun (2020)</b> | Malezya'nın gıda hizmet sektöründeki firmaları cari oran, öz sermaye kârlılığı, kâr marjı, borç/öz sermaye oranı, hisse başına kazanç, temettü getirisi ve fiyat kazanç oranı kriterlerini baz alarak TOPSIS metoduyla finansal performansı değerlendirmiştir.                                             |
| <b>Çanakçıoğlu ve Küçükönder (2020a)</b> | BİST Gıda ve İçecek Endeksi'ndeki 21 işletmenin 2014-2018 dönemi finansal performansları 13 farklı rasyo ile incelenmiştir. Entropi ve TOPSIS yöntemleriyle yapılan analizde, Türk Tuborg ve Konfrut Gıda'nın farklı dönemlerde en iyi performansı sergilediği saptanmıştır.                               |
| <b>Aldalou ve Perçin (2020)</b>          | Gıda ve içecek şirketlerinin 2015-2017 dönemi finansal durumları, kârlılık ve piyasa oranları gibi değişkenler üzerinden değerlendirilmiştir. Kriterler FSE ile ağırlıklandırılmış ve en başarılı firmalar FEDAS yöntemi kullanılarak tespit edilmiştir.                                                   |
| <b>Akbulut ve Şenol (2021)</b>           | BİST Gıda, İçecek ve Tütün sektöründeki 26 firmanın 2015-2020 dönemi verileri 15 farklı mali gösterge ile analiz edilerek yatırımcılar için en uygun seçenekler belirlenmiştir. SD ve PROMETHEE yöntemlerinin kullanıldığı çalışmada, işletme başarısında en etkili unsurun cari oran olduğu saptanmıştır. |
| <b>Tüminçin (2022)</b>                   | COVID-19 pandemisinin gıda sektöründeki 17 şirket üzerindeki finansal etkileri 2017-2020 dönemi verileriyle araştırılmıştır. Belirlenen likidite ve kârlılık kriterleri Entropi ve PROMETHEE yöntemleriyle derecelendirilerek pandemi öncesi ve sonrası dönemler karşılaştırılmıştır.                      |
| <b>Gül ve Erdem (2022)</b>               | BİST' te işlem gören dört büyük gıda perakende firmasının 2013-2020 dönemi performansları, 20 finansal ve 3 finansal olmayan gösterge üzerinden incelenmiştir. Entropi ve TOPSIS yöntemleriyle yapılan değerlendirmede BİM' in stok yönetimi ve şube kapasitesiyle öne çıktığı görülmüştür.                |
| <b>Batır (2022)</b>                      | Gıda perakende şirketlerinin COVID-19 pandemisi sürecindeki (2019-2021) performans değişimlerinin saptanması                                                                                                                                                                                               |

|                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                        | amaçlanmıştır. Kriterler SWARA ile ağırlıklandırılmış ve işletmelerin krizi etkin yönetme başarıları TOPSIS yöntemiyle analiz edilmiştir.                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>Pala (2023)</b>                                     | BIST Gıda, İçki ve Tütün endeksindeki 25 işletmenin pandemi öncesi ve süreci (2019-2021) arasındaki performans değişimleri yedi temel mali oran üzerinden karşılaştırılmıştır. Bu rasyolar SD ve WISP yaklaşımlarıyla işlenerek, pandemi döneminde artan tüketim talebinin firma başarılarına etkisi incelenmiştir.                                                |
| <b>Aneesha (2024)</b>                                  | Hindistan gıda endüstrisinde faaliyet gösteren altı büyük şirketin performansı hammadde maliyetleri, rekabet ortamı ve yasal düzenlemeler dikkate alınarak incelenmiştir. Net kâr marjı, cari oran ve borçluluk yapısı üzerinden yapılan TOPSIS değerlendirmesiyle şirketlerin gelecek potansiyelleri karşılaştırılmıştır.                                         |
| <b>Azhar ve Rahim (2024)</b>                           | Malezya gıda endüstrisindeki şirketlerin finansal sağlıkları ve pazar payı içindeki rekabet güçleri değerlendirilmiştir. TOPSIS yöntemiyle yapılan analizde, küresel krizin firma yapılarına baskısı incelenerek yatırımcılar için en dirençli ve gelecek vadeden şirketler saptanmıştır.                                                                          |
| <b>Ayaydın ve Öksüz (2024)</b>                         | BIST Gıda İçecek Endeksi'ndeki 20 firmanın 2022 yılsonu verilerini kullanarak, 10 farklı rasyo üzerinden finansal performans ile hisse senedi getirileri arasındaki ilişki incelenmiştir. CRITIC ve TOPSIS analizleriyle, finansal performansı yüksek şirketlerden oluşan portföylerin daha başarılı sonuçlar verdiği kanıtlanmıştır.                              |
| <b>Demirel (2025)</b>                                  | COVID-19 pandemisi sonrasında BIST XGIDA endeksinde yer alan 22 işletmenin 2020-2023 dönemi finansal performansları 9 temel oran üzerinden ölçülmüştür. Veriler MOORA yöntemiyle değerlendirilerek Dardanel ve Selçuk Gıda'nın öne çıkan performansları raporlanmıştır.                                                                                            |
| <b>Rouhani Rad, Akhavan Anvari ve Raissifar (2025)</b> | Tahran Borsası'nda gıda ve içecek sektöründe işlem gören 14 şirketin 2018-2020 dönemindeki performanslarını kârlılık ve verimlilik odaklı analiz edilmiştir. Bayesian Best-Worst, CoCoSo, MARCOS yöntemlerinin sonuçları, yüksek borçlanma maliyetlerinin performansı düşürdüğünü ve işletmelerin özsermaye yapılarını etkin yönetmeleri gerektiğini göstermiştir. |
| <b>Uygurtürk (2025)</b>                                | Rusya gıda sektöründeki işletmelerin 2019-2023 dönemi finansal performansları kaynak kullanım etkinliğini ve kârlılık istikrarını yansıtan 10 rasyo üzerinden karşılaştırılmıştır. Kriterler CRITIC ile ağırlıklandırılıp, CoCoSo ve COPRAS yöntemleriyle sektörün en güçlü mali yapıya sahip işletmeleri sıralanmıştır.                                           |
| <b>Mukherjee ve Chakraborty (2025)</b>                 | Hindistan'daki beş büyük hızlı tüketim ürünleri (FMCG) şirketinin 2020-2024 dönemi finansal başarıları likidite, kârlılık, borç karşılama ve verimlilik odaklı 10 rasyo ile analiz edilmiştir. Kriterler Shannon Entropi ile ağırlıklandırılarak şirketlerin başarı sıralamaları TOPSIS yöntemiyle gerçekleştirilmiştir.                                           |

### 3.3.2. Lojistik ve Ulaştırma Sektörü Çalışmaları

Lojistik firmalarının finansal başarısı; kârlılık, aktif kullanım verimliliği, borç ödeme gücü ve likidite yönetimi gibi birbiriyle çelişebilen çok sayıda göstergenin eş zamanlı olarak değerlendirilmesini gerektiren karmaşık bir süreci kapsamaktadır. Bu çok boyutlu yapıyı bilimsel bir çerçevede analiz ederek işletmeleri sektör içindeki rakipleriyle objektif bir biçimde kıyaslamak amacıyla ÇKKV yöntemleri, yöneticiler, yatırımcılar ve politika yapıcılar için rasyonel birer analiz aracı olarak ön plana çıkmaktadır (Işık, 2022; Mansyur ve Saban, 2023; Oztemiz, Vatansever ve Bayraktar, 2025; Kahramani-Koç ve Öztürk, 2025). Tablo 9’da bu sektörde yer alan çalışmalar anlatılmaktadır.

**Tablo 9:** Lojistik ve Ulaştırma Sektörü Çalışmaları

| Yazar ve Yıl                          | Çalışmanın Amacı ve Bulguları (Özet)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Akgün ve Temür (2016)</b>          | BİST ulaştırma endeksine kayıtlı iki büyük havayolu şirketinin (Pegasus ve THY) 2010-2015 dönemi finansal performansları 12 farklı rasyo ile analiz edilmiştir. Belirlenen rasyolar TOPSIS yöntemi kullanılarak genel şirket performansını gösteren tek bir puana çevrilmiş ve şirketlerin yıllık başarı sıralamaları saptanmıştır.                             |
| <b>Tufan ve Kılıç (2019)</b>          | BİST’ te işlem gören lojistik firmalarının 2014-2018 dönemi finansal durumları, cari oran, nakit oranı ve özsermaye kârlılığı gibi sekiz kriter üzerinden değerlendirilmiştir. İşletmelerin göreceli başarı sıralamaları TOPSIS ve VIKOR yöntemleri kullanılarak elde edilmiştir.                                                                               |
| <b>Orhan, Altın ve Aytekin (2020)</b> | 2007 yılından beri İstanbul’da şehir içi toplu taşıma alanında faaliyet gösteren "İstanbul Otobüs İşletmeleri Ticaret Anonim Şirketi’nin" (Otobüs AŞ) 2011-2018 yılları arası finansal performansı 14 rasyo üzerinden incelenmiştir. Kriterler CRITIC ile ağırlıklandırılarak, TOPSIS yöntemiyle şirketin yıllara göre finansal başarı grafiği oluşturulmuştur. |
| <b>Erdoğan ve Kırbaç (2021)</b>       | Fortune 500 listesindeki lojistik şirketlerinin 2015-2019 dönemi finansal performansları, net satışlar, faiz ve vergi öncesi kâr ile ihracat gibi beş temel kriter üzerinden değerlendirilmiştir. Entropi ile ağırlıklandırılan kriterler kullanılarak işletmeler WASPAS yöntemiyle başarı sırasına dizilmiştir.                                                |
| <b>Işık (2022)</b>                    | Fortune 500 Turkey listesindeki lojistik firmalarının performansları, ihracat miktarı ve çalışan sayısı gibi operasyonel göstergeler üzerinden incelenmiştir. Ağırlıkları Gri Entropi ve FUCOM ile hesaplanan kriterler doğrultusunda EDAS-M yöntemiyle firmalar sıralanmıştır.                                                                                 |
| <b>Mansyur ve Saban (2023)</b>        | Türkiye’de faaliyet gösteren ulaştırma ve depolama şirketlerinin 2009-2021 dönemi finansal performansları uzun vadeli bir perspektifle değerlendirilmiştir. Konsolide finansal tablolardan elde edilen rasyoların Entropi ile ağırlıklandırıldığı çalışmada, sektörün başarı sıralaması TOPSIS yöntemiyle yapılmıştır.                                          |
| <b>Kahramani-Koç ve Öztürk (2025)</b> | BIST Ulaştırma ve Depolama Sektörü firmalarının 2013-2022 dönemi performansları, kârlılık ve büyüme oranları üzerinden                                                                                                                                                                                                                                          |

analiz edilmiştir. Entropi ile önceliklendirilen sekiz kriter kullanılarak şirketler MAIRCA ve MABAC yöntemleriyle sıralanmıştır.

**Oztemiz (2025)** vd. BİST Ulaştırma endeksindeki lojistik şirketlerinin 2022-2024 dönemi finansal performansları sürdürülebilir bir yaklaşımla ölçülmüştür. Literatür taramasıyla elde edilen kriterlerin ağırlıkları SIWEC, MEREC ve LODECI ile belirlenmiş ve başarı sıralamaları CoCoSo yöntemiyle elde edilmiştir

### 3.3.3. Turizm ve Konaklama Sektörü Çalışmaları

Dünya ekonomisinde döviz geliri ve istihdam yaratma açısından merkezi bir role sahip olan turizm sektörü, dışsal şoklara ve mevsimsel değişimlere en açık endüstrilerden biridir. Sektördeki işletmelerin finansal verimliliklerinin ölçülmesi, yöneticilerin zayıf yönlerini görerek geleceğe yönelik stratejiler geliştirmelerine imkân tanır. ÇKKV teknikleri, turizm firmalarının çok boyutlu performans göstergelerini rasyonel bir çerçevede değerlendirme fırsatı sunmaktadır (Pala, 2021; Türegün, 2022). Tablo 10'da bu sektörde yer alan çalışmalar anlatılmaktadır.

**Tablo 10:** Turizm ve Konaklama Sektörü Çalışmaları

| Yazar ve Yıl                      | Çalışmanın Amacı ve Bulguları (Özet)                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Özçelik ve Kandemir (2015)</b> | Türk turizm sektöründeki yedi işletmenin 2010-2014 dönemi finansal verimlilikleri TOPSIS yöntemiyle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Belirlenen sekiz rasyo üzerinden işletmelerin göreceli başarı puanları hesaplanarak sıralanmıştır.                                                                                             |
| <b>Pala (2021)</b>                | BİST turizm endeksindeki firmaların Covid-19 pandemisi dönemindeki performans değişimleri 2016-2020 verileriyle incelenmiştir. Belirlenen 8 kriter CİLOS ile ağırlıklandırılarak işletmelerin nihai başarı sıralaması MAIRCA yöntemiyle elde edilmiştir.                                                                                       |
| <b>Türegün (2022)</b>             | BİST bünyesindeki on turizm şirketinin 2018-2020 yıllarına ait finansal başarılarının yatırımcı kararlarını desteklemek amacıyla ölçülmesi hedeflenmiştir. Büyüme ve piyasa çarpanlarını da içeren 20 farklı finansal kriter Entropi yöntemiyle ağırlıklandırılmış ve şirketlerin başarı sıralaması TOPSIS ve VIKOR yöntemleriyle yapılmıştır. |

### 3.3.4. Teknoloji Sektörü Çalışmaları

Yüksek katma değer sağlama yeteneğiyle dikkat çeken teknoloji sektörü, Ar-Ge yoğunluklu yapısı nedeniyle sürekli fona ihtiyaç duyan bir alandır. ÇKKV yöntemleri, teknoloji firmalarının mali yapılarını uzun vadeli perspektifle sıralayarak başarılı işletmeler için optimum finansal standartların belirlenmesine yardımcı olmaktadır (Pala, 2023; Gürkan ve Aldoury, 2021; Orçun ve Eren, 2017). Tablo 11'de bu sektörde yer alan çalışmalar anlatılmaktadır.

**Tablo 11: Teknoloji Sektörü Çalışmaları**

| Yazar ve Yıl             | Çalışmanın Amacı ve Bulguları (Özet)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Orçun ve Eren (2017)     | BİST’ te işlem gören 13 teknoloji şirketinin 2010-2015 dönemi finansal performansları 9 finansal oran kullanılarak TOPSIS yöntemiyle analiz edilmiştir. Elde edilen başarı sıralamalarının şirketlerin hisse senedi getirileriyle olan ilişkisi incelenmiştir.                                                                                       |
| Gürkan ve Aldoury (2021) | BIST Teknoloji Endeksi'ndeki (XUTEK) 15 şirketin 2017-2019 dönemi finansal başarıları likidite oranları, finansal yapı oranları, karlılık oranları gibi oranlar üzerinden karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Şirketlerin performans skorları TOPSIS yöntemiyle hesaplanarak sektörde başarılı olanların finansal yapıları ortaya konmuştur. |
| Pala (2023)              | BİST Teknoloji ve Bilişim Sektöründeki 14 şirketin 2010-2021 dönemi finansal performansları incelenerek farklı yöntemlerin sonuçları birbiriyle karşılaştırılmıştır. Kriter ağırlıkları CRITIC ile saptanmış, şirketlerin başarı sıralamaları ise GİA ve WASPAS yöntemleriyle belirlenmiştir.                                                        |

#### 4. Sonuç ve Tartışma

Bu derleme çalışması kapsamında incelenen geniş literatür ve sunulan sektörel uygulama tabloları (Tablo 1-11), Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinin işletmelerin finansal performanslarını değerlendirmede ne derece esnek, güçlü ve vazgeçilmez bir araç seti sunduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Çalışmanın temel yazılma gerekçesi olan; literatürde dağınık halde bulunan ve farklı sektörlerle odaklanan yüzlerce çalışmayı ortak bir metodolojik zeminde buluşturma ihtiyacı, bu derleme ile sistematik bir yapıya kavuşturulmuştur.

##### 4.1. Metodolojik Çıkarımlar ve Literatürdeki Dönüşüm

Literatürdeki boşluk incelendiğinde, geleneksel çalışmaların büyük bir bölümünün sadece kârlılık veya likidite gibi tekil boyutlara odaklandığı görülmektedir. Ancak bir işletmenin yüksek kâr marjına sahip olmasına rağmen, yüksek borçluluk nedeniyle ciddi iflas riski taşıyabileceği gerçeği, analizlerin bütüncül bir perspektifle ele alınmasını zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda ÇKKV yöntemleri; likidite, kârlılık, mali yapı ve faaliyet verimliliği gibi birbiriyle çelişebilen çok sayıda göstergiyi aynı anda değerlendirerek rasyonel bir analiz zemini sunmakta ve literatürdeki bu metodolojik eksikliği gidermektedir.

Çalışmanın en önemli metodolojik çıkarımı, literatürün son yıllarda subjektif yargılardan arındırılmış hibrit modellere doğru evrilmiş olmasıdır. Özellikle 2024 ve 2025 yıllarına ait güncel çalışmalarda; kriter ağırlıklarının belirlenmesinde karar vericinin öznelliğini tamamen dışlayan Entropi, CRITIC, MEREC, LOPCOW ve NMV gibi veriye dayalı yöntemlerin baskın hale geldiği

görülmektedir. Bu eğilim, finansal performans analizlerinin sadece bir tercih meselesi olmaktan çıkıp, tamamen matematiksel bir kanıta dayandırılma çabasını yansıtmaktadır. Sıralama aşamasında ise, geleneksel TOPSIS ve VIKOR yöntemlerinin yanına; daha karmaşık veri setlerini işleyebilen MARCOS, MABAC, CoCoSo ve COBRA gibi ileri düzey algoritmaların eklenmesi, rasyolar arasındaki çelişkili durumları dengeleyerek firmalar için tek bir nihai başarı skoru üretilmesini sağlamaktadır.

#### **4.2. Sektörel Sentez ve Uygulama Odakları**

İncelenen tüm veriler; imalattan enerjiye, bankacılıktan teknolojiye kadar her sektörün kendine özgü finansal dinamikleri olduğunu, ancak bu dinamiklerin tamamının ÇKKV modelleriyle rasyonel birer başarı skoruna dönüştürülebileceğini kanıtlamaktadır. Sanayi ve İmalat sektöründe operasyonel verimlilik ve kârlılık rasyoları belirleyici olmaya devam ederken, Finansal Hizmetler sektöründe aktif kalitesi ve sermaye yeterliliği gibi risk temelli göstergeler ön plana çıkmaktadır. Ayrıca, Sürdürülebilirlik Endeksi üzerine yapılan çalışmaların artması, finansal performansın artık sadece mali verilerle değil, çevresel ve sosyal sorumluluk kriterleriyle de harmanlandığını kanıtlamaktadır. Çalışmanın özgün katkısı, sektörel bazda hangi yöntemlerin hangi kriter setleriyle daha etkin sonuçlar verdiğini sistematik bir şekilde haritalandırmış olması ve yatırımcılar için tek boyutlu analiz tuzağından kurtulma rehberi sunmasıdır.

#### **4.3. Sınırlılıklar ve Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler**

Her bilimsel çalışma gibi bu derlemenin de bazı yöntemsel ve kapsamsal sınırlılıkları bulunmaktadır. İlk olarak, finansal rasyo seçiminin veri ulaşılabilirliğine dayanması, girdi verileri farklı olduğu için sonuçların mutlak bir karşılaştırmasını zorlaştırmaktadır. İkinci olarak, bulanık (fuzzy) mantık temelli modeller belirsizliği modelleyebilse de uzman seçimindeki özneliği tamamen ortadan kaldıramamaktadır. Ayrıca, performansın sadece geçmişe dönük bilanço ve gelir tablosu verileriyle ölçülmesi; firmaların piyasa değeri, marka algısı ve AR-GE vizyonu gibi kalitatif ve geleceğe dönük göstergelerinin analize dahil edilmesini kısıtlamaktadır. Birçok çalışmanın sadece BIST odaklı olması ise KOBİ ölçeğindeki işletmelerin analizini sınırlı bırakmıştır.

Gelecekteki çalışmalar için bu derleme; yapay zekâ, makine öğrenmesi ve büyük veri analitiğinin ÇKKV süreçlerine tam entegre edildiği daha dinamik modellerin araştırılması gerektiğini işaret etmektedir. Ayrıca, sürdürülebilirlik kriterlerinin finansal modellere daha derinlemesine eklenmesi, literatüre özgün katkılar sağlayacaktır.



Sonuç olarak bu çalışma; sanayi üretimi, finansal hizmetler ve teknoloji odaklı sektörlerde faaliyet gösteren firmalar için özgün bir performans takip yol haritası sunmaktadır. Metodolojik eşitliliği sistematik bir sınıflandırma ile sentezleyen bu derleme, araştırmacılar, yatırımcılar ve politika yapıcılar için kapsamlı bir başvuru kaynağı ve stratejik bir karar destek zemini teşkil etmektedir.

## KAYNAKÇA

- Acar, M. (2019). Finansal performansın belirlenmesinde ve sıralanmasında TOPSIS çok kriterli karar verme yönteminin kullanılması: BIST sigorta şirketleri uygulaması. *Finansal Araştırmalar ve Çalışmalar Dergisi*, 11(21), 136-162.
- Agrawal, A., Agarwal, R., Agrawal, B., Pandey, S., & Kumari, A. (2024). Performance evaluation and management of Indian manufacturing organizations through fuzzy optimization techniques. *International Journal of Experimental Research and Review*, 44, 245-256.
- Ağ, A., & Kuloğlu, E. (2020). İşletmelerin finansal performansının veri zarflama analizi yöntemiyle tespit edilmesi: Borsa İstanbul'da işlem gören enerji işletmelerine yönelik bir uygulama. *OPUS – Uluslararası Toplum Araştırmaları Dergisi*, 16(Özel Sayı), 3756-3772.
- Akbulut, O. Y., & Şenol, Z. (2021). Bütünleşik SD ve PROMETHEE ÇKKV yöntemleri ile portföy optimizasyonu: BİST gıda, içecek ve tütün sektöründe ampirik bir uygulama. *Muhasebe ve Finansman Dergisi*, (92), 161-182.
- Akbulut, R., & Rençber, Ö. F. (2015). BİST'te imalat sektöründeki işletmelerin finansal performansları üzerine bir araştırma. *Muhasebe ve Finansman Dergisi*, (65), 117-136.
- Akçakanat, Ö., Eren, H., Aksoy, E., & Ömürbek, V. (2017). Bankacılık sektöründe Entropi ve WASPAS yöntemleri ile performans değerlendirmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 22(2), 285-300.
- Akgül, Y. (2019). Çok kriterli karar verme yöntemleri ile Türk bankacılık sisteminin 2010-2018 yılları arasındaki performansının analizi. *Finans Ekonomi ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 4(4), 567-582.
- Akgün, A. (2022). BIST enerji şirketlerinin CRITIC ve CODAS bütünleşik yaklaşımı ile finansal açıdan değerlendirilmesi. *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (48), 339-358.
- Akgün, M., & Temür, A. S. (2016). BIST ulaştırma endeksine kayıtlı şirketlerin finansal performanslarının TOPSIS yöntemi ile değerlendirilmesi. *Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi*, (ICAFR 16 Özel Sayısı), 173-186.
- Aksu, M., & Geçer, E. (2023). Borsa İstanbul'da enerji şirketlerinin nakit akım oranlarına dayalı finansal performans analizi. *Finans Ekonomi ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 8(2), 322-334.
- Aldalou, E., & Perçin, S. (2020). Financial performance evaluation of food and drink index using Fuzzy MCDM approach. *Uluslararası Ekonomi ve Yenilik Dergisi*, 6(1), 1-19.

- Alimohammadlou, M., & Bonyani, A. (2017). A novel hybrid MCDM model for financial performance evaluation in Iran's food industry. *Accounting and Financial Control*, 1(2), 38-45.
- Aneesha, S. R. (2024). Financial performance evaluation in India's food industry using the TOPSIS method. *Trends in Finance and Economics*, 2(2), 200-210.
- Arslan, E., & Keskin, O. (2025). Finansal performansın çok kriterli karar verme teknikleriyle analiz edilmesi: BIST taş ve toprağa dayalı sektöründe bir uygulama. *International Journal of Economic and Administrative Academic Research*, 5(1), 170-188.
- Avcı Öztürk, B., & Özçelik, F. (2015). Bist kimya, petrol, plastik sektöründe yer alan firmaların finansal performansının tümeşik bir çok kriterli karar verme yöntemi ile değerlendirilmesi. *Paradoks Ekonomi, Sosyoloji ve Politika Dergisi*, 11(2), 34-62.
- Ayaydın, H., & Öksüz, O. (2024). Çok kriterli karar verme yöntemlerinin hisse senedi portföyü seçim aracı olarak kullanımı: CIRITIC tabanlı TOPSIS. *Paradigma İktisadi ve İdari Araştırmalar Dergisi*, 13(2), 223-251.
- Ayçin, E. (2018). BIST Menkul Kıymet Yatırım Ortaklıkları Endeksinde (XYORT) yer alan işletmelerin finansal performanslarının Entropi ve Gri İlişkisel Analiz bütünleşik yaklaşımı ile değerlendirilmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 33(2), 595-622.
- Ayçin, E., & Orçun, Ç. (2019). Mevduat bankalarının performanslarının Entropi ve MAIRCA yöntemleri ile değerlendirilmesi. *Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 22(42), 175-194.
- Aydın, Y. (2019). Türkiye'de hayat/emeklilik sigorta sektörünün finansal performans analizi. *Finans Ekonomi ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 4(1), 107-118.
- Aytekin, A., & Karamaşa, Ç. (2017). Analyzing financial performance of insurance companies traded in BIST via Fuzzy Shannon's Entropy based Fuzzy TOPSIS methodology. *Alphanumeric Journal*, 5(1), 51-84.
- Azhar, F. W., & Rahim, Z. H. A. (2024). Evaluating financial performance of food service companies: A TOPSIS-based approach. *International Journal of Academic Research in Accounting, Finance and Management Sciences*, 14(1), 173-183. doi:10.6007/IJARAFMS/v14-i1/20637
- Bağcı, H., & Yiğiter, Ş. Y. (2019). BİST'te yer alan enerji şirketlerinin finansal performansının SD ve WASPAS yöntemleriyle ölçülmesi. *Bingöl Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 9(18), 877-898.
- Batır, T. E. (2022). COVID 19 sürecinde gıda perakende sektörünün performans değerlendirmesi: SWARA temelinde TOPSIS yöntemi ile bir inceleme. *Ekonomi, Politika & Finans Araştırmaları Dergisi*, 7(Özel Sayı), 194-210. doi:10.30784/epfad.1157494

- Baydaş, M., & Eren, T. (2021). Finansal performans ölçümünde ÇKKV yöntem seçimi problemine objektif bir yaklaşım: Borsa İstanbul'da bir uygulama. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İİBF Dergisi*, 16(3), 664-687. doi:10.17153/oguuiibf.947593
- Bektaş, S. (2023). BİST sigortacılık (XSGRT) endeksindeki şirketlerin 2021 yılı finansal performanslarının ÇKKV yöntemleriyle değerlendirilmesi. *Yönetim ve Ekonomi Dergisi*, 30(4), 787-815.
- Çakalı, K. R., & Baloğlu, G. (2022). Profitability performance analysis of BIST manufacturing sub-sectors with different multi criteria decision making methods. *Akademik Yaklaşımlar Dergisi*, 13(2), 377-405.
- Çakır, S. (2016). Türk sigortacılık sektöründe çok kriterli karar verme teknikleri (ÇKKV) ile performans ölçümü: BİST uygulaması. *Çukurova Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 20(1), 127-147.
- Çalışkan, E., & Eren, T. (2016). Bankaların performanslarının çok kriterli karar verme yöntemiyle değerlendirilmesi. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(2), 85-107.
- Çanakçıoğlu, M., & Küçükönder, H. (2020a). Entropi ve TOPSIS bütünlük yaklaşımı ile BIST gıda ve içecek endeksindeki şirketlerin finansal performanslarının değerlendirilmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Elektronik Dergisi*, 11(2), 200-217.
- Çanakçıoğlu, M., & Küçükönder, H. (2020b). Borsa İstanbul'daki çimento işletmelerinin etkinlik ve performanslarının çok kriterli karar verme yöntemleri ile analizi. *Muhasebe ve Denetim Bakış*, (61), 165-192.
- Çiftçi, H. N., & Yıldırım, B. F. (2020). BİST enerji sektöründe faaliyet gösteren işletmelerin finansal performanslarının incelenmesi: Gri sayılara dayalı zaman kesiti örneği. *Muhasebe Bilim Dünyası Dergisi*, 22(3), 384-404.
- Çilek, A., Şeyranlıoğlu, O., & Konuş, C. (2025). Profitability based financial performance analysis in BIST basic metal industry sector: LOPCOW-RSMVC hybrid multi-criteria decision making model. *İşletme | The Business Journal*, 6(1), 1-29.
- Dağıstanlı, H. A. (2023). Energy companies in Borsa Istanbul Sustainability Index: An analysis with HFTOPSIS. *Journal of Business Research*, 1(1), 39-49.
- Demirci, F. (2023). Mülkiyet yapılarına göre Türk bankacılık sektörünün yönetim yeterliliği performansının Entropi-MARCOS yöntemiyle analizi. *Verimlilik Dergisi*, 57(2), 327-342.
- Demirel, E. (2025). COVID-19 salgını sonrası gıda ve içecek sektörünün (XGIDA) finansal performansının MOORA yöntemiyle analizi. *Uluslararası Sosyal ve Beşeri Bilimler Araştırma Dergisi*, 12(121), 1453-1461.

- Dwivedi, R., Prasad, K., Mandal, N., Singh, S., Vardhan, M., & Pamucar, D. (2021). Performance evaluation of an insurance company using an integrated Balanced Scorecard (BSC) and Best-Worst Method (BWM). *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 4(1), 33-50.
- Erdoğan, B. (2022). BİST'e kayıtlı bankaların finansal performansının AHP-SD tabanlı PIV yöntemiyle değerlendirilmesi. *Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (52), 93-109. doi:10.30784/pausbed.1059473
- Erdoğan, H. H., & Kırbaç, G. (2021). Financial performance measurement of logistics companies based on entropy and waspas methods. *İşletme Araştırmaları Dergisi*, 13(2), 1093-1106. doi:10.20491/isarder.2021.1186
- Eren, S. A., & Çelik, İ. E. (2020). Finansal performansın ölçülmesinde TOPSİS yönteminin kullanımı: Türk bankacılık sektörü uygulaması. *İçtimaiyat Sosyal Bilimler Dergisi*, 4(2), 171-180.
- Gazel, Y. H., Altınırnak, S., & Karamaşa, Ç. (2021). Türkiye'de faaliyet gösteren ticari bankaların çok kriterli karar verme yöntemlerine göre performanslarının sıralanması. *Sosyoekonomi*, 29(48), 161-180. doi:10.17233/sosyoekonomi.2021.02.09
- Ghaemi-Zadeh, N., & Eghbali-Zarch, M. (2024). Evaluation of business strategies based on the financial performance of the corporation and investors' behavior using D-CRITIC and fuzzy MULTI-MOORA techniques: A real case study. *Expert Systems with Applications*, 247(123183), 1-13.
- Gökdemir, T., & Gökay Emel, G. (2023). BIST sigorta şirketlerinin CRITIC temelli PROMETHEE II yöntemi ile performans analizi. *Dicle Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 13(26), 598-625.
- Gül, A., & Erdem, M. (2022). Gıda perakende firmalarının finansal performanslarının Entropi-TOPSIS yöntemiyle analizi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (35), 25-33. doi:10.31590/ejosat.1029907
- Gülcemal, T., & İzci, A. Ç. (2024). Türk katılım bankacılığı sektörünün LOPCOW-MOOSRA modeliyle analizi. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 25(1), 115-134.
- Güleç, Ö. F., & Özkan, A. (2018). Gri ilişkisel analiz yöntemi ile finansal performansın değerlendirilmesi: BİST çimento şirketleri üzerine bir araştırma. *Muhasebe ve Denetim Bakış*, 18(54), 77-96.
- Gök Kısa, A. C., & Perçin, S. (2020). Bulanık çok kriterli karar verme yaklaşımıyla Türkiye imalat sanayii'nde performans ölçümü. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, (Prof. Dr. Talha USTASÜLEYMAN Özel Sayısı), 31-56.
- Gönüllü, O. (2022). Türk ana metal sanayi şirketlerinin COVID-19 pandemisi dönemindeki finansal performanslarının Entropi – MARCOS bütünlüklü

- yaklaşımı ile değerlendirilmesi. *Marmara Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 44(1), 53-77. doi:10.14780/muiibd.1135471
- Güçlü, P., & Muzaç, G. (2024). Genişletilmiş Gri MULTIMOORA yöntemi ile çok dönemli çok kriterli karar verme: Demir-çelik sektöründe finansal performans değerlendirmesi örneği. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 19(1), 267-291. doi:10.17153/oguiibf.1373450
- Gürkan, S., & Aldoury, N. (2021). TOPSIS çok kriterli karar verme yöntemi ile karşılaştırmalı finansal performans analizi: Teknoloji şirketleri üzerine bir araştırma. *Finans Ekonomi ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 6(2), 225-239.
- Günay, B., & Kaya, İ. (2017). Borsa İstanbul'da yer alan aracı kurumların performansının çok kriterli karar verme yöntemleri ile değerlendirilmesi. *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 15(2), 141-164.
- Hacıfettahoğlu, Ö., & Perçin, S. (2020). Bütünleşik ÇKKV yaklaşımı ile finansal boyutta Türk inşaat firmalarının performansının değerlendirilmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 22(2), 543-567.
- Hoe, L. W., Siew, L. W., Fai, L. K., Xin, A. L. J., & Fun, L. P. (2020). An empirical evaluation on the performance of food service industry in Malaysia with TOPSIS model. *Journal of Physics: Conference Series*, 1706(1), 012172. doi:10.1088/1742-6596/1706/1/012172
- Işık, Ö. (2019). Türk mevduat bankacılığı sektörünün finansal performanslarının Entropi tabanlı ARAS yöntemi kullanılarak değerlendirilmesi. *Finans Ekonomi ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 4(1), 90-99.
- Işık, Ö. (2022). Gri Entropi, FUCOM ve EDAS-M yöntemleriyle Türk lojistik firmalarının çok kriterli performans analizi. *Journal of Yasar University*, 17(66), 472-489.
- Kahramani-Koç, A., & Öztürk, S. (2025). Analysis of financial performance of companies in the BIST transportation and storage sector with multi-criteria decision-making techniques. *Sosyoekonomi*, 33(64), 159-181.
- Karahan, M., & Kızılcapan, L. (2022). Çok kriterli karar verme teknikleriyle bankaların finansal performanslarının karşılaştırmalı analizi. *Verimlilik Dergisi*, 57(3), 441-462. doi:10.51551/verimlilik.953606
- Kartal, C. (2020). Katılım bankalarının kar ve maliyet kriterleri açısından VIKOR yöntemi ile performans analizi. *Yönetim ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 18(1), 158-175.
- Kartal, C., Özdil, Z., & Acar Karaboğa, M. (2024). BIST Sürdürülebilirlik 25 Endeksi firmalarının çok kriterli karar verme yöntemleri ile finansal performans analizi. *Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi*, (ICMEB'24 Özel Sayı), 79-100.

- Karaoğlu, S., & Şahin, S. (2018). BİST XKMYA işletmelerinin finansal performanslarının çok kriterli karar verme yöntemleri ile ölçümü ve yöntemlerin karşılaştırılması. *Ege Akademik Bakış*, 18(1), 63-80.
- Karcioğlu, R., Yalçın, S., & Gültekin, Ö. F. (2020). Sezgisel bulanık mantık ve Entropi tabanlı çok kriterli karar verme yöntemiyle finansal performans analizi: BİST’de işlem gören enerji şirketleri üzerine bir uygulama. *Manas Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 9(1), 360-372.
- Katı, M. (2025). BİST’te işlem gören sigorta şirketlerinin Sv-Edas yöntemleri ile performans analizi. *Muhasebe ve Vergi Uygulamaları Dergisi*, 18(1), 133-150.
- Kavas, Y. B., Medetoğlu, B., & Öztürk, M. (2023). Finansal performans analizi: TOPSIS ve MOORA yöntemleri ile BIST elektrik gaz ve buhar sektörü üzerine bir uygulama. *Ekev Akademi Dergisi*, (94), 330-344.
- Kaya, A., Pamucar, D., Gürler, H. E., & Ozcalici, M. (2024). Determining the financial performance of the firms in the Borsa Istanbul sustainability index: Integrating multi criteria decision making methods with simulation. *Financial Innovation*, 10(1), 1-44.
- Kaya, A., & Coşkun, A. (2016). VZA ile işletmelerde etkinliğin ölçülmesi: BİST gıda, içki ve tütün sektöründe bir uygulama. *Erzincan Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 9(1), 231-242.
- Kınalı, F. (2025). Comparative analysis of financial structures: An application on the BIST sustainability participation index using the Mabac method. *Ekonomi ve Finansal Araştırmalar Dergisi*, 7(1), 37-52.
- Köse, A., & Akıllı, K. (2021). Aracı kurumların finansal performanslarının VIKOR yöntemi ile değerlendirilmesi. *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 22(2), 168-192.
- Lam, W. S., Liew, K. F., & Lam, W. H. (2019). Investigation on the performance of construction companies in Malaysia with Entropy–TOPSIS model. *Journal of Physics: Conference Series*, 1372(1), 012051. doi:10.1088/1742-6596/1372/1/012051
- Madenoglu, F. S., Ünlüsoy, Ö. F., & Yılmaz, Ç. (2022). Performance evaluation of energy companies with a novel integrated multi-criteria decision making method. *Kafkas Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 13(26), 640-658.
- Maya, R., & Eren, T. (2018). Türk gıda sektörünün finansal performans analizinin çok kriterli karar verme yöntemleri ile yapılması. *Verimlilik Dergisi*, (3), 31-60.
- Mansyur, A., & Saban, M. (2023). Entropi-Topsis ile ulaştırma ve depolama sektörünün finansal performans analizi. *JOMELIPS - Journal of*

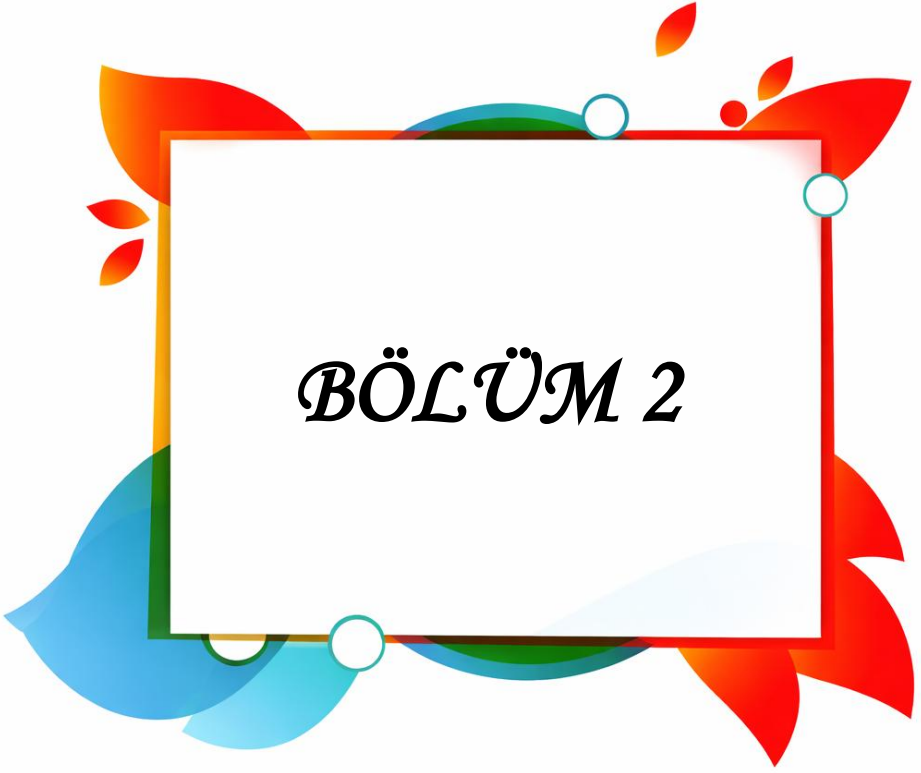
- Medetoğlu, B. (2024). Çok kriterli karar verme yöntemleriyle finansal performans analizi: BIST aracı kurumları üzerine uygulama. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, (45), 115-132.
- Metin, S., Yaman, S., & Korkmaz, T. (2017). Finansal performansın TOPSIS ve MOORA yöntemleri ile belirlenmesi: BİST enerji firmaları üzerine karşılaştırmalı bir uygulama. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 14(2), 371-394.
- Meydan, C., Yıldırım, B. F., & Senger, Ö. (2016). BIST'te işlem gören gıda işletmelerinin finansal performanslarının gri ilişkisel analiz yöntemi kullanılarak değerlendirilmesi. *Muhasebe ve Finansman Dergisi*, (69), 147-171. doi:10.25095/mufad.396668
- Moghimi, R., & Anvari, A. (2014). An integrated fuzzy MCDM approach and analysis to evaluate the financial performance of Iranian cement companies. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(1-4), 685-698. doi:10.1007/s00170-013-5370-6
- Mukherjee, D., & Chakraborty, S. (2025). Analysis of financial performance parameters of five FMCG companies by MCDM techniques. *International Scientific Journal of Engineering and Management (ISJEM)*, 4(5). doi:10.55041/ISJEM03303
- Orçun, Ç. (2019). Enerji sektöründe WASPAS yöntemiyle performans analizi. *BAİBÜ Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 19(2), 439-453.
- Orçun, Ç., & Eren, B. S. (2017). TOPSIS yöntemi ile finansal performans değerlendirmesi: XUTEK üzerinde bir uygulama. *Muhasebe ve Finansman Dergisi*, (75), 139-154.
- Orhan, M., Altın, H., & Aytekin, M. (2020). Çok kriterli karar verme yöntemleriyle finansal performans değerlendirme: ulaştırma alanında bir uygulama. *Turkish Studies - Economy*, 15(1), 395-410.
- Oztemiz, H. H., Vatansever, K., & Bayraktar, T. (2025). Sustainable financial performance analysis of logistics companies listed on Borsa Istanbul: An integrated multi-criteria decision-making approach. *Sustainability*, 17(20), 9243.
- Ömürbek, N., & Eren, H. (2016). PROMETHEE, MOORA ve COPRAS yöntemleri ile oran analizi sonuçlarının değerlendirilmesi: Bir uygulama. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 8(16), 174-187.
- Öner, M. H., & Bağcı, H. (2025). NMV tabanlı TOPSIS yöntemi ile İslam İşbirliği Teşkilatı ülkelerinde İslami bankaların finansal performans analizi.



- Özbek, A. (2016). BİM mağazalar zincirinin 2008-2015 dönemi finansal performansının ELECTRE III yöntemi ile ölçümü. *Kırıkkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 6(2), 273-288.
- Özbek, A. (2019). *Çok kriterli karar verme yöntemleri ve Excel ile problem çözümü*. Ankara: Seçkin Yayıncılık.
- Özçelik, H., & Kandemir, B. (2015). BİST’de işlem gören turizm işletmelerinin TOPSIS yöntemi ile finansal performanslarının değerlendirilmesi. *Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 18(33), 97-114.
- Özdemir, O., & Parmaksız, S. (2022). BIST enerji işletmelerinin finansal performanslarının çok kriterli karar verme teknikleri ile karşılaştırılması: TOPSIS ve EDAS yöntemleri ile analiz. *Başkent Üniversitesi Ticari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 6(1), 34-56.
- Özkan, T. (2020). Türk bankacılık sektöründe finansal performans ölçmede TOPSIS yönteminin kullanımı: Katılım bankaları üzerine bir uygulama. *Maliye ve Finans Yazıları*, (113), 47-64.
- Pala, O. (2021). BIST Turizm endeksinde yer alan firmaların CILOS ve MAIRCA tabanlı finansal performans analizi. *Abant Sosyal Bilimler Dergisi*, 21(2), 163-185.
- Pala, O. (2022a). BIST sigorta endeksinde CRITIC ve MULTIMOOSRAL tekniklerine dayalı finansal analiz. *İzmir İktisat Dergisi*, 37(1), 218-235.
- Pala, O. (2022b). İMV ve WASPAS tabanlı aracı kurum performans değerlendirilmesi. *Anadolu Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 23(3), 266-281.
- Pala, O. (2023). SD ve WISP yaklaşımları ile gıda sektöründe finansal performans analizi. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 24(1), 59-79.
- Rouhani Rad, S., Akhavan Anvari, M. R., & Raissifar, K. (2025). An integrated ranking model of Tehran Stock Exchange companies using Bayesian best-worst, CoCoSo, and MARCOS methods (Case study: Food and beverage companies). *International Journal of Finance and Managerial Accounting*, 10(39), 55-88.
- Samancı, T. H. (2025). Katılım bankalarının finansal performanslarının değerlendirilmesi: Gri ilişkisel analiz yöntemi. *The Journal of International Scientific Researches*, 10(2), 265-275.
- Şahin, İ. E., & Karacan, K. B. (2019). BIST’te işlem gören inşaat işletmelerinin çok kriterli karar verme yöntemleri ile finansal performans ölçümü. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 3(2), 162-172.

- Shen, K. Y., Hu, S. K., & Tzeng, G. H. (2017). Financial modeling and improvement planning for the life insurance industry by using a rough knowledge based hybrid MCDM model. *Information Sciences*, 375, 296-313.
- Taşçı, M. Z., & Yurttadur, M. (2025). BIST enerji sektöründe finansal performans ve hisse senedi getirisi ilişkisine yönelik hibrit ÇKKV (Wenslo ve Aras) yaklaşımıyla bir vaka uygulaması. *Üçüncü Sektör Sosyal Ekonomi Dergisi*, 60(3), 2354-2371.
- Tazegül, A. (2025). Çok kriterli karar verme yöntemi ile finansal performans değerlendirmesi: BIST 50 şirketleri üzerine bir uygulama. *Ünye İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 7(2), 106-127.
- Terzioğlu, M. K., Temelli, S., Yaşar, A., & Özdemir, Ö. (2023). Bankacılık sektöründe finansal ve çevresel performansların çok kriterli karar verme yöntemleri ile karşılaştırılması. *KTÜ Sosyal Bilimler Enstitüsü Sosyal Bilimler Dergisi*, 13(25), 21-45.
- Torbati, A. R., & Sayadi, M. K. (2018). A new approach to investigate the performance of insurance branches in Iran using best-worst method and fuzzy inference system. *Journal of Soft Computing and Decision Support Systems*, 5(4), 13-18.
- Tufan, C., & Kılıç, Y. (2019). Evaluation of the financial performance of logistics enterprises traded in Borsa İstanbul with TOPSIS and VIKOR methods. *C.U. Journal of Economics and Administrative Sciences*, 30(1), 119-137.
- Türegün, N. (2022). Financial performance evaluation by multi-criteria decision-making techniques. *Heliyon*, 8(5), e09361.
- Tüminçin, Ö. K. (2022). Analysis of the financial performance effect of the COVID-19 pandemic on the BIST food and beverage index using Entropy and PROMETHEE methods. *JOMELIPS – Journal of Management Economics Literature Islamic and Political Sciences*, 7(1), 57-83.
- Ünal, E. A. (2019). Bütünleşik Entropi ve EDAS yöntemleri kullanılarak BIST sigorta şirketlerinin performansının ölçülmesi. *Finans Ekonomi ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 4(4), 555-566.
- Ünal, E. A., & Taşçı, M. Z. (2022). Türk katılım sigortacılığı sektörünün SD-Waspas modeliyle analizi. *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Meslek Yüksekokulu Dergisi*, 25(2), 781-792.
- Uygurtürk, H. (Ed.). (2025). *Finans alanında uygulamalı araştırmalar*. Gaziantep: Özgür Yayınları. doi:10.58830/ozgur.pub902
- Vatansever, K., & Bayraktar, T. (2025). BIST katılım sürdürülebilirlik endeksinde yer alan imalat sektörü şirketlerinin finansal performansının MEREK ve COBRA yöntemleriyle incelenmesi. *Ekonomi, Politika & Finans Araştırmaları Dergisi*, 10(Özel Sayı), 275-304.

- Wanke, P., Azad, M. A. K., Barros, C. P., & Hassan, M. K. (2016). Predicting efficiency in Islamic banks: An integrated multicriteria decision making (MCDM) approach. *Journal of International Financial Markets, Institutions and Money*, 45, 126-141.
- Yalçın, G. C., Kara, K., & Özyürek, H. (2025). Evaluating financial performance of companies in the Borsa Istanbul Sustainability Index using the CRITIC-MABAC method. *Spectrum of Operational Research*, 2(1), 323-346.
- Yavuz, H., Öztel, A., & Öz, Y. (2020). Bulanık VIKOR yöntemi ile finansal performans analizi: Türk kimya sektöründe bir uygulama. *Yönetim ve Ekonomi*, 27(3), 535-555.
- Yıldırım, M., Altan, İ. M., & Gemici, R. (2018). Kurumsal yönetim ile finansal performans arasındaki ilişkinin Entropi ağırlıklandırılmış TOPSIS yöntemi ile değerlendirilmesi: BİST’te işlem gören gıda ve içecek şirketlerinde bir araştırma. *Muhasebe ve Vergi Uygulamaları Dergisi*, 11(2), 130-152.
- Yılmaz Özekenci, S. (2024). BIST enerji endeksi şirketlerinin LOPCOW-CRITIC tabanlı CoCoSo yöntemleri ile finansal performans analizi. *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Meslek Yüksekokulu Dergisi*, 27(1), 48-64.



## *BÖLÜM 2*

# **İstatistiki Sağlam Deney Tasarımı ve Sürdürülebilir Kalite Mühendisliği: Dinamik Taguchi Metodu ile Bir Uygulama**

*Saime Taphasanoğlu<sup>1</sup>*

## **1. GİRİŞ (INTRODUCTION)**

İkinci Dünya Savaşını ağır yaralarla atlatan Japonya' da ilerleyen yıllarda amaç; Dünya piyasalarında kalitesiz mal olarak nitelenen Japon ürünlerini yüksek kaliteli, düşük maliyetli ve rekabet gücü yüksek olarak piyasaya sürmektir. Yapılan çalışmalar kısa sürede neticesini verdi ve bilgi batıdan doğuya olan seyrini değiştirip doğudan batıya doğru akmaya başladı. Kalite ile ilgili en büyük yenilik Dr. Genichi Taguchi tarafından getirildi. Taguchi, Japonya' da Nippon Telefon ve Telgraf Firması için Ortogonal Dizilere dayanan deneyler ve kontrol parametrelerinin "optimum ayarları" ile çok daha düşük "varyans" sağlayan bir yöntem geliştirdi. ABD' de Taguchi yöntemleri olarak adlandırılan ancak Dr. Taguchi' nin 'Kaliteli Mühendislik' diye isimlendirdiği yöntem ile deney tasarımı' nın en iyi sonuçları elde etmek için kontrol parametrelerinin optimizasyonu ile birleştirilmesi Taguchi tarafından başarılmış oldu.

1980'de ABD' ye girişinden sonra Dr. Taguchi'nin kalite mühendisliği sistemi yaygın bir şekilde uygulanmış ve geniş ölçüde tartışılmıştır. Bu kapsamlı kalite mühendisliği sistemiyle karşılaşan çoğu insan, metodun sadece bir kısmını ele almıştır. Ayrıca bağlamsal sorunlar da ortaya çıktı. Birçok araştırmacı, araştırmaya benzemediğinden şikâyet etti ancak metod araştırma değil, geliştirme ve üretim amaçlı olarak geliştirilmişti (Taguchi, 1993b).

AT & T, Xerox, Ford ve ITT gibi pek çok şirket Dr. Taguchi' nin çalışmalarını ürün geliştirmenin farklı safhalarında uygulamıştır. Kalite mühendisliği sisteminin gücünü gösteren binlerce vaka incelemesi yapılmıştır. Taguchi metodu sayesinde kalitenin bir ürünü veya bir prosesi kontrol ederek elde edilemeyeceği günümüzde açıkça anlaşılmıştır.

---

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi, İstanbul Rumeli Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, ORCID ID: 0000-0002-1280-8387

İleri teknolojinin ve ezici rekabetin hâkim olduğu günümüzde firmalar yeni ürünleri etkin bir şekilde geliştirebilmeli, mevcut ürünleri rafine edebilmeli ayrıca kalite ve maliyet açısından kusursuz ürünler üretebilecek sağlam teknolojiler geliştirmelidir. Dr. Taguchi, tasarım sürecinin ilk safhalarına uygulanabilir bir yöntem ortaya koymuştur. Bu sayede sağlam teknolojiler kolay ve düşük maliyetle geliştirilebilir. Tasarım aşamasında kalitenin sağlanması maliyet açısından da son derece önemlidir. Çünkü ürün maliyetinin genellikle %80'i tasarım sürecinin ilk %20'sinde alınan kararlarla belirlenir (80/20 kuralı). Bu nedenle yeni veya geleneksel bir teknolojinin "işlevselliğini" en üst düzeye çıkarmak için kullanılabilecek potansiyel gürültü faktörlerinin, kontrol ve ayar faktörlerinin ve uygun performans kriterlerinin tanımlanması da dâhil olmak üzere bir dizi faaliyeti dikkate alarak tasarım aşamasının işlevselliği artırılmalıdır. Bu çalışmalar deneyler veya simülasyon teknikleri kullanılarak gerçekleştirilebilir. Yapılan çalışmalar firmalara yüksek kaliteli, düşük maliyetli ve müşterinin talep ettiği zamanda ürünler geliştirmeyi sağlayacaktır. Böylece yüksek rekabet ortamında avantaj elde edilecektir.

Taguchi' nin önerdiği metotlar istatistiksel deney tasarım metotlarından. Deney tasarımı, süreç veya sistemlerin girdi değişkenlerinde değişiklik yapılarak çıktı değerinin gözlenmesi ve analiz edilmesidir (Montgomery, 2005). 1920 yıllarında İngiliz istatistikçi Ronald Fisher ve arkadaşları tarafından geliştirilmiş ancak değişkenliğin azaltılması için ilk olarak Taguchi tarafından kullanılmıştır (Akman ve Özkan, 2011).

Taguchi, geleneksel kalite tanımlamalarından farklı olarak kaliteyi ürün müşteriye pazarlandıktan sonra toplumda ortaya çıkan kayıp olarak tarif eder (Bryne ve Taguchi, 1986). Sosyal içerikli böyle bir tarif daha önce yapılmamıştı. Taguchi geliştirdiği Sağlam mühendislik anlayışında kaliteyi iki grupta ele almıştır.

1.Müşteri odaklı kalite

2.Mühendislik kalitesi

Taguchi kaliteyi ürünlerin fonksiyonel değişim miktarı, çevre zararları ve işletme giderleri gibi olabilecek tüm olumsuz etkiler olarak tanımlanan kalite kaybı ile değerlendirmektedir (Taguchi, 1993b). Taguchi' nin statik problemleri ile ilgili ülkemizde ve dünyada çok sayıda çalışma yapılmıştır. Ancak dinamik sistemlerle ilgili ülkemizde çalışma yapılmamıştır. Dünya literatüründe konu ile ilgili çalışmalar artarak devam etmekte olup bu çalışmada sadece dinamik sistemler ile ilgili olanlara yer verilmiştir.

Huang ve arkadaşları (1998) yaptıkları çalışmada, Sistem performansını optimize etmek için Taguchi Dinamik Sinyal-Gürültü oranı ve analizleri bir

otomotiv klima kompresörü tasarımına uygulanmış. Kompresör performansını etkileyen önemli parametreleri tanımlamak ve optimize etmek için Taguchi deney tasarımı; iki seviyeli on bir kontrol edilebilen faktör, 2 seviyeli bir gürültü faktörü ve üç sinyal faktörü ile deneyler yapılmıştır. Deneyde 12 kompresör kullanılmış ve tasarım parametrelerinin optimize edilmiş kombinasyonu elde edilmiştir.

Hsieh ve arkadaşları (2005) yaptıkları çalışmada, Tayvan'daki Endüstriyel Teknoloji Araştırma Enstitüsünün Kimya Laboratuvarlarında etil asetoasetat proses deney projesinin biyolojik olarak indirgenmesi ile ilgilenmişler. Çalışmada Taguchi 'nin dinamik sistemini dikkate alarak çoklu yanıt problemini optimize etmek için istatistiksel regresyon analizi ve arzu edilebilirlik fonksiyonunu kullanan bir prosedür önermişlerdir. İlk olarak, regresyon analizini, kalite değişimini önemli derecede etkileyen kontrol faktörlerini ve Taguchi dinamik sisteminin duyarlılığını önemli derecede etkileyen ayar faktörlerini belirlemek için kullanmışlar. Ardından, çok yanıtlı problemi optimize etmek için arzu edilebilirlik fonksiyonunu uygulamışlardır.

Wu ve arkadaşları (2005) yaptıkları çalışmada, geleneksel Quartz gaz sensörü sisteminin dinamik özelliklerini optimize etmek için Taguchi'nin sinyal gürültü oranı analizini benimsemişler. Depolanmış kütlenin QCN biyosensörünün rezonans frekansı çıkışı üzerindeki etkilerini araştırmak için zamandan ve maliyet açısından verimli sonlu elemanlar analiz yöntemini kullanmışlardır. İç dizide  $L_{18}(2^7 \times 3^1)$  ortogonal dizisi kullanılmıştır. Dış dizi için üç seviyeli bir sinyal faktörü ve gürültü faktörü ise imalat sırasında quartz kristal kalınlıklarındaki boyut hataları olarak kabul edilmiştir. Yapılan çalışmada Taguchi metodu bilgisayar simülasyonu ile ilk kez birleştirilmiş, değişkenlik azaltılırken hassasiyet artırılmıştır.

Bahloul vd. (2006), yaptıkları çalışmalarında bükme işlemi sırasında araçlar tarafından parçaya uygulanan kuvveti ve maksimum gerilimi en küçükleme için DT'na dayanan cevap yüzeyi yöntemini kullanmışlardır. Dixon vd. (2006) tıbbi cihaz üretimi sürecinde DT'nı kullanmışlardır. Rojas vd. (2006), çalışmalarında dinamik sistem tanımlı min-max robust DT fikrini geliştirmişlerdir. Zhiyu, Zhen ve Xiangfen (2006), çoklu sağlam parametre tasarımına yeni bir çekicilik fonksiyonu metodu önermişlerdir. Önerdikleri metot geleneksel çekicilik fonksiyonlarından daha iyi sonuç vermiştir.

Yung-Tien ve arkadaşları (2007), yaptıkları çalışmada doğrusal olmayan çift sinyalli Taguchi uygulaması ile yüksek hassasiyetli bir konumlandırma cihazının tasarımını yapmışlardır. Dört seviyeli üç kontrol faktörü ve bir gürültü faktörü ile deneyler tasarlanmış ve optimum parametre setinin ayarlanmasında ANOVA (varyans analizi) uygulanmıştır. Deneylerde uygulanan voltaj dalga biçimleri,

SIMULINK, grafik paket programlama dili ile oluşturulmuştur. Doğrulama deneyleri Taguchi metodunun çift sinyal faktörlü uygulamasının %83' lük bir iyileşme sağladığını göstermiştir.

Anawa ve Olabi (2008), Taguchi Yöntemi' ni bir istatistiksel deney tasarımı tekniği olarak, belirlenmiş kaynaşma kesimi ile ilgili olarak gerekli kaynak parametrelerini belirlemek için kullanmışlardır. Cheng vd. (2008) ise farklı boyutlarda alt katmanın tortulaşmış silikon filmin kalınlık sapmasını minimize etmek için süreç parametrelerinin optimizasyonu amacıyla sayısal bir modeli Taguchi Yöntemi' nin dinamik modeline entegre etmişlerdir. Oudjene ve Ben-Ayed (2008) ise Taguchi Yöntemi' ni perçinleme ortak direnci ve perçinleme şekli üzerinde takım geometrisinin etkilerini incelemek için kullanmışlardır. Rosa vd. (2008), titanyum kablolarda bakır elektropozisyonu konusunda titanyum yüzey hazırlama, mevcut katodik yoğunluğu bakır sülfat ve sülfürik asit konsantrasyonlarının elektrik yoğunluğunun ve çözelti karışımının elektrodositin yapışması üzerindeki etkilerini  $L_{16}$  tasarım matrisi ile TY'ni kullanarak incelemişlerdir. Arvidsson ve Gremyr (2008), sağlam tasarım ilkeleri üzerindeki çatışmalar ve anlaşmalar ile ilgili bir literatür taraması yapmıştır. Bu çalışmada sağlam tasarımın dört temel ilkesi incelenmiştir: Varyasyonun varlığı, gürültü faktörlerinin duyarsızlığı, çeşitli yöntemlerin uygulanması ve tasarım sürecinin tüm aşamalarındaki uygulamalar.

Miller ve Wu (1996 ve 2001) yaptıkları iki ayrı çalışmada Taguchi' nin terminolojisini eleştirmişler ve statik sistemleri basit-yanıt sistemi, dinamik sistemleri ise sinyal-yanıt sistemleri olarak adlandırmışlardır. Taguchi' nin dinamik karakteristikli sistemler için geliştirdiği bu metodun kalite mühendisleri için potansiyel önemli bir araç olduğunu ancak teori ve metodoloji olarak sağlam bir yapı inşa etmeden yoksun olduğunu belirtmişler ve bu eksikliği giderecek çalışmalar yapmışlardır Miller ve Wu, (1996). Bu çalışma neticesinde dinamik sistemleri çoklu hedef sistemleri ve ölçüm sistemleri olarak iki kategoriye ayırmışlar ve enjeksiyon kalıplama örneği ile çalışmalarının geçerliliğini ispat etmişlerdir.

Wu ve Hamada (2001) çalışmalarında bu kategoriye bir üçüncüsünü ilave etmişlerdir. Çünkü sinyal-yanıt kavramı ürün/süreç geliştirmede önemli bir rol oynamakta ve bu sistemlerin sağlam parametre tasarımı olarak kalite geliştirmede güçlü ve etkin bir araç olmaya devam ettiğine dikkat çekmişler. Ayrıca Wu ve Hamada, S/N-sinyal gürültü oranı indeksi ile değerlendirilen dağılım ve hassasiyetin, sinyal-yanıt sistemlerinin iki önemli özelliği olduğunu belirtmişlerdir.

Wu ve Miller (2001) Taguchi' nin iki adımlı S/N modeline karşılık sinyal-yanıt sistemlerini optimize etmek için performans ölçüm modeli (Performance



Measure Modelling-PMM) ve yanıt fonksiyonu modeli (Response Function Modelling-RFM) diye iki model geliştirmişlerdir. PMM iki aşamalı bir modeldir. Birinci aşama performans ölçüsünün (PM) tahminini ikinci aşama ise PM tahminini kullanarak kontrol faktörlerinin bir fonksiyonu olarak PM' nin modellenmesini içerir. RFM ise kontrol ve gürültü faktörlerinin bir fonksiyonu olarak sinyal-yanıt ilişkisini modellemek için deneysel verileri kullanır. Daha sonra belirlenen performans ölçüsü uygun regresyon modelleri ile değerlendirilir. Çalışmanın sonucunda RFM' nin sistemi düzeltmek için kullanılabilen faktörleri göstermenin yanı sıra bu faktörlerin sistemi nasıl etkilediğini de gösterdiği ispat edilmiştir. Wu ve Miller' in bu çalışması Welch ve diğerlerinin (1990) ile Shoemaker ve diğerlerinin(1991) basit yanıt sistemleri için önerdiği uygulama modellerinin sinyal-yanıt sistemleri için geliştirilmiş halidir.

Wasserman (1996) çoklu regresyon modelini kullanarak dinamik karakteristiklerin parametre tasarımına bir vaka çalışması yapmıştır. Taguchi' nin sinyal gürültü oranını doğrusal istatistik modeli ile göstermiştir. Khatree (1996), gürültü faktörlerinin tümünün aynı anda incelenemediği durumlarda sağlam parametre tasarımını tahmin etmek için yanıt yüzeyi metodunu kullanmıştır.

Lunani, Nair ve Wasserman (1997) yaptıkları çalışmalarında kalite performans ölçütü olarak sinyal gürültü oranını kullanmanın dağılma etkisinde yapılan bir tek hatanın birçok hatalara sebep olduğunu göstermişlerdir. Dağılma ve duyarlılık etkilerinin arasındaki etkileşimden sakınmak amacıyla uygun dağılma tedbirlerini tanımlayan iki grafik metot geliştirmişlerdir.

Miller (2002) tek başına yaptığı çalışmasında sinyal-yanıt uygulamaları için önerilen üç metodu karşılaştırmıştır: Taguchi' nin sinyal-gürültü oranı, Nair, Lunani ve Wasserman' nin grafiksel yaklaşımı ve Wu ve Miller' in 2002 yılında önerdikleri yaklaşım. Yaptığı çalışmada yeni bir grafik tekniğı tanıtmıştır: Ortak etki grafiğı. Roshan ve Wu (2002), çoklu yanıt sistemlerinin analizinde sinyal gürültü oranının nasıl uygulanacağını tanımlamıştır. Ayrıca çoklu hedef sistemleri için teoriksel bir formülasyonu tanıtmış ve bir kısmının pratik bir uygulamasını göstermiştir.

Lesperance ve Park (2003), dinamik karakteristiklerin sağlam tasarımını değerlendirmek için standart regresyon modelleme tekniklerine dayalı genelleştirilmiş lineer bir model önermiştir.

Wu ve Yeh (2005) yaptıkları çalışmalarında kalite kayıp fonksiyonuna dayalı bir yaklaşımı çoklu dinamik problemlerin optimizasyonuna uygulamışlardır. Çalışmalarındaki amaç çoklu dinamik kalite karakteristikleri deneylerinde ortalama kalite kaybını minimize etmektir.

Hsieh ve arkadaşları (2005) , Taguchi'nin dinamik sistemini dikkate alarak çoklu yanıt problemini optimize etmek için istatistiksel regresyon analizi ve arzu edilebilirlik fonksiyonunu kullanan bir prosedür önermişlerdir. Regresyon analiziyle kalite değişimini önemli derecede etkileyen kontrol faktörlerini ve Taguchi dinamik sisteminin duyarlılığını etkileyen ayar faktörlerini belirlemişler daha sonra çok yanıtlıların optimizasyonu için omega dönüşümü adını verdikleri bir öneri sunmuşlardır. Optimizasyonda istenilebilirlik fonksiyonu kullanmışlardır. Önerilen prosedürün etkinliği, Tayvan'daki Endüstriyel Teknoloji Araştırma Enstitüsü Birliği Kimya Laboratuvarlarında etil asetoasetat proses deney projesinin biyolojik olarak indirgenmesinin bir örneği ile gösterilmiştir.

Gupta, Kulahci, Montgomery ve Freze (2009), iki varyans bileşeni ile karakterize ettikleri sinyal - yanıt sistemine split-plot yaklaşımı önermişlerdir.

Tsai, Wu, Chiang ve Chen (2009) yaptıkları çalışmalarında, çıktı yanıtı girdi sinyali ile doğrusal bir ilişki içerisinde olan bir SAW (Yüzeysel Akustik Dalga) gaz sensörü sisteminin dinamik özelliklerini optimize etmek için Taguchi sinyal gürültü oranı analizini benimsemişlerdir. Mevcut dinamik karakteristikleri incelemenin amacı; değişkenliği azaltırken eş zamanlı olarak ölçüm sisteminin hassasiyetini artırmaktır. Sonuçlar göstermiştir ki önerilen metodoloji sadece tasarım maliyetini azaltmakla kalmamış aynı zamanda sensörlerin performansını da arttırmıştır.

Roy (2010), Otomotiv sektöründe egzoz emisyonlarını azaltmak amacıyla motor parametrelerini Taguchi Metodu kullanarak optimize etmiştir. Elde edilen optimal oarametre değerleriyle motorlardaki yakıt tüketimi düşürülmüş ve karbon emisyon oranları azaltılarak çevreye verilen olumsuz etkiler önemli ölçüde düşürülmüştür.

Dasgupta, Miller ve Wu (2010), ölçüm sistemlerinin sağlam tasarımını tek bir parametre tasarımı deneyiyle ölçüm varyasyonunun azaltılması ve tahmini için entegre bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Doğrusal bir sinyal-yanıt ilişkisi düşünmüşlerdir.

Yadav, Bhamare ve Rathore (2010), yaklaşımları tek bir model haline getirerek hem de çok amaçlı optimizasyon temelli hibrid bir kalite kayıp fonksiyonu önerilerini birleştirdiklerini göstermişlerdir.

Kumar ve diğerleri (2011) Taguchi yöntemini kullanarak döküm prosesinin parametrelerinin eniyilendiği bir çalışma gerçekleştirmişlerdir.

Truong, Shin Jung (2011), çıkış yanıtlarının zaman içinde ölçüldüğü farmasötik çalışmalardan meydana gelen sağlam tasarım problemlerinin çözümüne odaklanmışlardır.

Boylan ve Cho (2013), çoklu ve karışık tipteki kalite karakteristiklerini modellemek için geliştirilmiş bir yaklaşım sağlayan asimetrik sistem özelliklerini daha doğru ve tam temsil edilmesini sağlamak için çarpık normal dağılımın kullanıldığı disiplinler arası bir sağlam parametre tasarımı metodolojisi önermişlerdir.

Boylan, Goethals ve Rao Cho (2013), çoğaltma maliyeti ve üretilen çözümlerin istenilen hassasiyeti arasında bir değiş tokuş (trade-off) analizi önermişlerdir. Yaptıkları çalışmada karar vericiye potansiyel seçenekleri göstermek amacıyla Monte Carlo simülasyonunu bir araç olarak kullanarak, deneysel tasarımın erken aşamalarında çeşitli teknikleri dikkate almışlardır.

Chen ve arkadaşları (2013), plastik enjeksiyon kalıplama sistemlerinin üretim süreç parametrelerini optimize etmek için Taguchi Metodu kullanmışlardır. Elde edilen sağlam tasarım sonuçları ile enerji tüketim oranları azaltılmış ve parça kalitesindeki varyasyonlar düşürülmüştür.

Çoklu dinamik kalite özellikleri için parametre tasarımının optimize edilmesi ile ilgili çalışma sayısı oldukça azdır. Bu konuyla ilgili çalışmaları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

Chang (2008), çoklu dinamik kalite özelliklerini optimize etmek için çekicilik fonksiyonu temeline dayalı bir prosedür önermiştir. En iyi faktör ayarlamasını bulmak için tavlama benzetimi (Simulated Annealing-SA) yaklaşımını kullanmıştır. Problemin çözümünde yanıt değişkenleri yerine yanıtların sinyal gürültü oranlarını kullanmış buna ilaveten yanıtları değerlendirmek için tek bir dizin oluşturmada geometrik ortalama kullanmıştır. Ancak çekicilik fonksiyonlarına Zhiyu ve arkadaşlarının Chang' in çalışmasına getirdiği eleştiri göz ardı edilemeyecek boyuttadır. Çekicilik fonksiyonu sadece yanıtlar ve hedefleri arasındaki mesafeye odaklanır, gözlemlerin değişimini düşünmediğini belirtmişler. Bu nedenle, gürültü faktörü etkisinin ve tasarım parametresi dalgalanmasının yaklaşımda göz ardı edilmesine neden olduğunu ve sonuçları tamamen değerlendirmek için hassas bir dizin almadığını iddia etmişlerdir (Zhiyu, Zhen ve Xiangfen, 2006).

Tong ve Su (1997), çoklu sinyal-yanıt problemlerine TOPSİS metodunu önermişlerdir. Yanıtlar arasındaki sinyal-gürültü oranına odaklanmışlar ve tıpkı Chang gibi yanıtlar arasındaki korelasyonu dikkate almamışlardır.

Jalili, Bashiri ve Amiri 2011' de çok değişkenli dinamik Taguchi tasarımı optimize etmek için Veri Zarflama Analizi (Data Envelopment Analysis - DEA) kullanmışlardır. Bu çalışmadaki temel farklılık korelasyon konusudur. Veri zarflama analizi yanıtlar arasındaki korelasyonu dikkate almaz, ancak çalışmanın uygulama kısmında kullanılacak olan çok değişkenli proses kapasite indeksi ile yanıt değişkenleri arasındaki korelasyonu hesaba katarak çalışmışlardır. Dahası çok yanıtlı kapasite indeksi normallik varsayımı şartı gerektirirken veri zarflama analizi normallik şartı getirmediğine dikkat çekmişlerdir. Veri zarflama analizi ve çok değişkenli proses kapasite indeksi arasındaki farklılıklara rağmen her iki metotta yanıt değişkenleri ve kontrol edilebilir faktörler arasındaki lineer olmayan ilişkiler için uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Amiri, Bashiri, Mogouie ve Doroudyan (2012) proses kapasite endeksine dayalı non-normal bir yanıt optimizasyon yöntemini önermişlerdir.

Pal ve Gauri (2010), çoklu regresyon tekniği ve Taguchi sinyal-gürültü oranı kavramını entegre ettikleri yeni bir yöntem önermişlerdir. Çalışmada iki deneysel veri seti bu metotla analiz edilmiştir. Metot, toplam sinyal-gürültü oranlarının yanı sıra tek tek yanıtların hedef değerlerine yakınlığını da dikkate almıştır

## **2. TAGUCHİ SİNYAL-YANIT SİSTEMLERİ**

Taguchi Sinyal-Yanıt Sistemleri, Japon mühendis ve istatistikçi Genichi Taguchi tarafından geliştirilen, kaliteyi artırmayı ve süreçlerdeki değişkenliği azaltmayı amaçlayan bir yöntemdir. Bu sistem, özellikle ürün ve süreç tasarımında, gürültü faktörleri olarak adlandırılan dışsal etkenlerin performans üzerindeki etkilerini en aza indirmeye yönelik olarak kullanılır.

Taguchi yaklaşımında "sinyal", istenilen hedef performansı; "yanıt" ise sistemin bu sinyale verdiği karşılığı ifade eder. Amaç, sinyal ile yanıt arasındaki ilişkiyi optimize ederek, ürün ya da sürecin istenilen performansı tutarlı bir şekilde göstermesini sağlamaktır. Bu yöntem, istatistiksel deney tasarımı (DOE- Design of Experiment) teknikleriyle birlikte kullanılarak, en az deneme ile en yüksek kaliteyi elde etmeye olanak tanır.

Taguchi sinyal-yanıt sistemleri otomotivden elektroniğe, makine tasarımından proses mühendisliğine kadar birçok alanda; özellikle de performansın çevresel koşullardan etkilenebileceği durumlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

### **2.1. Kalite Mühendisliği –Taguchi Metodu**

Ürün planlamasının ilk aşamasında birçok imalat şirketi, yeni ürünlerin üretim maliyetleri ve güvenilirliği için hedef değerler belirlemektedir. Bununla birlikte, bu hedef değerlerin bu aşamada kararlaştırılması iyi bir fikir değildir; Bunun

yerine, bu ilk aşamada hedef fonksiyonların hedef değerleri, satış fiyatı ve yeni ürünün çalışma ömrü belirlenmelidir.

Yeni ürünlerin maliyet ve kalite seviyeleri için hedef değerlerin belirlenmesi, ürün planlama bölümü değil, teknoloji ve üretim bölümlerinin sorumluluğundadır. Ne yazık ki, az sayıda işletme, yeni ürünlerin planlanan işlevleri veya hedefleri gerçekleştirebilmesini ve düşük maliyetle üretilmesini sağlamak için tasarım ve teknoloji bölümlerini güvenilir bir başka ifadeyle sağlam teknoloji geliştirme çalışmalarını teşvik etmek için bütçelerinden yeterince para ayırmaktadır.

Yeni bir ürünün işlevlerini belirlemek, ürün planlama departmanının görevidir. Aslında, bu görev hem bilim hem de mühendislik ile ilgili değildir, ancak insan ya da sosyal faktörler ile ilgilidir. Amaç fonksiyonlarına karar verdikten sonra, çeşitli çalışma koşulları altında fonksiyonları adanmaklı ve sağlam bir şekilde gerçekleştirebilen bir ürün geliştirilmelidir. Maliyeti düşürürken bu yeni ürünlerin veya teknolojilerin işlevsel sağlamlığının sağlanması kalite mühendisliğinin temel amacıdır. Mümkün olan en düşük maliyetle ürünlerin en üst düzeyde işlevsel sağlamlığını garanti edebilen, mümkün olan tüm tasarımlardan seçim yapmak kalite mühendisliğinin amacıdır (Taguchi, 1993b).

Ürün tasarım bölümleri, üretim maliyeti düşük, arıza çıkarmayan ve çevreye zarar vermeyen yeni ürünler tasarlamalıdır. Bu ideal hedeflere yaklaşmak için, tasarım bölümlerinin ulaşması istenen kalite ve maliyet hedefleri, yeni ürünün planlama aşamasında kurulmamalıdır; Bunun yerine, bu hedefler kendi tasarım bölümleri tarafından geliştirilmelidir. Böylece tasarım bölümleri belirli hedeflere ulaşmakla sınırlı kalmayacak aynı zamanda kalite seviyesini yükseltecek ve yeni ürünlerin maliyetini olabildiğince azaltarak elinden gelenin en iyisini yapacaktır. Taguchi' ye göre tasarım mühendislerinin ve üretim teknisyenlerinin ürün ve süreç tasarımında şu beş aşamaya dikkat etmesi gerekmektedir (Taguchi, 1993b).

1. **Sistem tasarımı:** İlk önce, gerekli işlevleri yerine getirebilecek tüm olası sistemleri düşünülmelidir. Mevcut sistemlere ek olarak, henüz geliştirilmemiş yeni sistemler de düşünülmelidir. Yeni sistemlerin geliştirilmesinin avantajı, genellikle patentlerle korunmasıdır. Birleşik Devletler' de, yeni sistemlerin geliştirilmesine katkıda bulunabilecek herkes genellikle yeni önerilen sistemlerin olası tüm güçlü ve zayıf yönlerini tartışmak üzere beyin fırtınası oturumlarında bir araya gelir. Daha sonra, bu insanlara ilişkin yargılar ve tartışmalar dikkate alınarak yeni sistemler seçilir. Bütün bu kararlar ve tartışmalar niceliksel ölçütlerden ziyade nitel temele dayansa da yeni sistemlerin seçiminde son derece önemlidir. Tasarım departmanlarının yeterli zaman, finansman ve diğer kaynakları varsa, aynı anda birkaç yeni sistem geliştirmeleri alternatif durumlar

için son derece faydalıdır. Sistem seçimi, kalite mühendisliğinde çok önemli bir görev olduğundan, bu ilk aşamada mümkün olan tüm teknolojileri değerlendirmelidir. Uygun olan yeni sistemleri seçtikten sonra, bu sistemlerin parametreleri için nominal (yazılı) değerleri belirlemeli ve daha sonra toleranslarını belirtmelidir.

2. **Parametre tasarımı:** Bu aşamada tasarım mühendisleri, kaliteyi arttırmak ve maliyeti düşürmek için seçilen sistemlerin uygun tasarım parametrelerini (sistem parametreleri) belirtmeleri gerekir. Sistem parametreleri arasındaki lineer olmayan ilişkiler ve sistem parametreleri ile "gürültü" ya da çevresel faktörler arasındaki etkileşimler, yeni sistemlerin nesnel işlevlerini çeşitli faktörlere karşı duyarsızlaştırmak için kontrol altında tutulmalıdır. Deneysel tasarım yöntemlerine ek olarak yanıt yüzeyi, doğrusal programlama, doğrusal olmayan programlama ve işletim penceresi yöntemleri ile parametre tasarımı daha verimli hale getirilebilir.

3. **Tolerans tasarımı:** Parametre tasarımından sonra, seçilen sistemlerin tüm bileşenleri için tolerans özelliklerini belirlemeli ve bu bileşenler için uygun malzeme sınıfları seçilmelidir. Tolerans tasarımının amacı, yeni sistemler tasarlarken kalite düzeyi ve maliyet arasındaki dengeyi belirlemektir. Tolerans tasarımının nesnel değerlendirme kriterleri, ürünlerin kalite kayıplarıdır. Bu kalite kayıpları genellikle, ürünlerin hedef değerlerindeki fonksiyonel sapma ve bu ürünlerin arızalanmasından kaynaklanan maliyetten hesaplanmaktadır.

4. **Tolerans özellikleri.** Tolerans tasarımından sonra, malzemelerin kalitesi ve bileşenlerin tolerans sınırları belirlenerek planlara yerleştirilmeli ve malzeme ve parça tedarikçileri ile bu sınırlara uygun malzeme ve hammadde için sözleşme imzalanmalıdır. Tolerans şartnamesi aşamasını tolerans tasarım aşamasıyla birleştirmek çok yaygındır.

5. **Üretim süreci için kalite yönetimi.** Bu aşamada, geri bildirim kontrol sistemleri, yeni ürünlerin kritik boyutlarının istatistiksel dağılımını kontrol etmek için tasarlanmalıdır. Kalite yönetim sistemi tarafından kullanılacak kaliteyi ölçen aletlerin tasarımı da bu aşamada özellikle önemlidir. Üretim tasarım mühendisleri ve teknisyenleri, ürünlerin kalite düzeyini ve yüksek kaliteli bileşenlerin ve malzemelerin maliyetini dengeleyen en iyi kalite yönetim metotlarını belirlemelidir. Kalite seviyesinin iyileştirilmesi ve ürünlerin maliyetinin düşürülmesi doğrudan üretim süreçleriyle ilişkili olduğundan, üretim teknolojisi departmanları ve üretim departmanları çabalarını bu noktalara ulaştırmaya odaklamalı ve böylece bu ürünlerin verimlilik endeksini geliştirmelidir.

## 2.2. Çevre, Sürdürülebilirlik ve Taguchi Metodunun İlişkisi

Günümüzde endüstriyel üretim sistemleri yalnızca kalite ve verimlilik odaklı değil, aynı zamanda çevresel etkileri minimize etmeyi ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerini desteklemeyi amaçlamaktadır. Bu bağlamda, üretim süreçlerinin hem ekonomik hem de çevresel performansını optimize etmeye yönelik sistematik yaklaşımlar giderek önem kazanmaktadır. Taguchi deney tasarımı yöntemi, bu hedeflere ulaşmada etkili araçlardan biri olarak öne çıkmaktadır.

Taguchi yöntemi, ürün ve süreç tasarımında kaliteyi artırmak ve dışsal değişkenlerden kaynaklanan varyasyonu azaltmak amacıyla geliştirilmiş bir deneysel optimizasyon yöntemidir. Bu yaklaşımda temel amaç, sistemin performansını dışsal (gürültü) faktörlere karşı daha kararlı ve duyarsız (robust) hale getirmektir (Taguchi, 1986). Bu özelliği, yöntemi sadece kalite iyileştirme değil, aynı zamanda çevresel etkilerin azaltılması ve kaynakların verimli kullanımı açısından da önemli bir araç haline getirir.

Taguchi'nin Sinyal-Gürültü (S/N) oranı, kalite karakteristiklerinin istatistiksel ölçümünde kullanılırken aynı zamanda sürecin enerji, malzeme ve zaman gibi kaynaklar açısından ne kadar verimli çalıştığını da gösterme potansiyeline sahiptir.

Taguchi yöntemi, sürdürülebilir üretim hedeflerine ulaşmada aşağıdaki şekillerde katkı sağlayabilmektedir:

1. **Hammadde ve enerji tüketiminin azaltılması:** Taguchi'nin ortogonal dizi yaklaşımı, daha az deneyle optimum parametrelerin belirlenmesini sağlar. Bu da üretim sürecinde kullanılan kaynakların azaltılmasına doğrudan katkı sunar (Phadke, 1989).

2. **Atık miktarının düşürülmesi:** Süreç parametrelerinin optimize edilmesi sayesinde hatalı üretim oranı azalır. Bu da fire, yeniden işleme ve üretim artıkları gibi çevresel açıdan olumsuz çıktıları minimize eder.

3. **Emisyonların azaltılması:** Özellikle enerji yoğun veya kimyasal işlem içeren üretim süreçlerinde, optimum işlem koşullarının belirlenmesi sayesinde çevreye yayılan emisyonlar kontrol altına alınabilir.

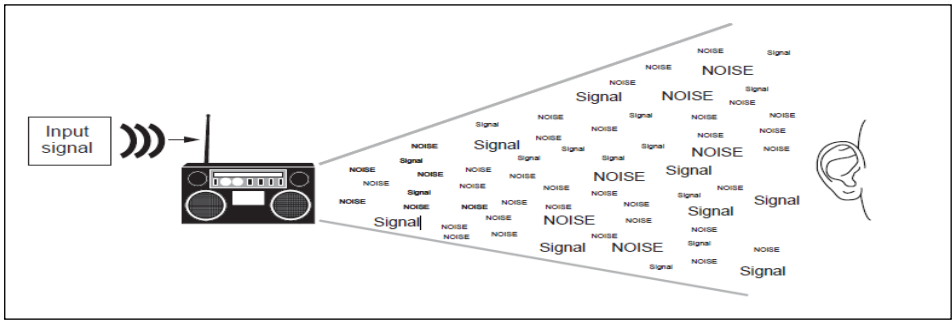
4. **Dayanıklı ve uzun ömürlü ürün tasarımı:** Taguchi yöntemi ile geliştirilen sağlam ürün tasarımları, daha az bakım gerektirir ve daha uzun süre kullanılabilir. Bu durum, ürünün yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini azaltır ve döngüsel ekonomiyi destekler.

### 2.3. Taguchi Metodunun Dayandığı Temel Prensipler

Taguchi (1991), Phadke (1989) ve Park (1996), ürün/sürecin performansını artırmak için pek çok mühendislik uygulamasında başarılı bir şekilde uygulanan

Taguchi Yöntemleri hakkında ayrıntılı tartışmalar yapmıştır. Bu çalışmalar neticesinde yöntemlerin son derece yararlı ve uygun maliyetli oldukları kanıtlanmıştır. Aşağıda, bu yöntemlerin farklı yönlerinin kısa açıklamaları bulunmaktadır (Taguchi v.d., 2004).

**1. Enerji Dönüşüm İlkesi:** Taguchi yöntemlerinin en önemli yönü, giriş sinyalinden çıktı tepkisine kadar sistemdeki enerji dönüşümünü yöneten uygun bir fonksiyon (ideal fonksiyon olarak adlandırılır) bulmaktır. Sonuçların analizini yaparken elektriksel kontrol teorisinde kullanılan istatistiksel performans ölçüsünü kullanmaktadır (Phadke, 1989). Kontrol edilemeyen veya gürültü faktörlerinin etkisini en aza indirgeyerek enerji dönüşümünü maksimize etmek önemlidir. Taguchi yaklaşımı, sistem performansını yani kaliteyi iyileştirmek için sistemin işlevselliğini ölçer. Bu ölçüm sinyal/gürültü (S/N) oranları aracılığıyla yapılır. Şekil 5.1’ de görülen radyo frekanslarında olduğu gibi S/N oranı ne kadar yüksekse enerji dönüşümü o kadar fazla ve dolayısıyla sistemin verimliliği de o kadar yüksektir (Taguchi v.d., 2004).



Şekil 2.1.Radyo Frekansları için Sinyal/ Gürültü Oranı (Taguchi v.d., 2004)

**2. Kontrol ve gürültü faktörleri arasındaki etkileşimlerin sömürülmesi:** Taguchi, kontrol edilebilen faktörler arasındaki etkileşimi ölçmekle değil kontrol edilebilen ve gürültü faktörleri arasındaki etkileşimle ilgileniyor, amacı, gürültü faktörlerine karşı sağlam tasarım yapmaktır.

Taguchi’ ye göre kalite değişkenlik azaltıldığı zaman iyileştirilir. Taguchi, değişkenliği azaltmak için ürünü en iyi usul, teknoloji ve tekniklerle üretmeyi ve tüm ürünleri aynı üretmeyi yani ürünler arasındaki değişkenliği azaltmayı hedeflemektedir. Ürün tasarım aşamasında belirlenen hedeflere uygun üretilirse kalite elde edilir. Değişkenliğin kaynağı olan faktörleri; kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen (gürültü) faktörler olarak iki gruba ayırmıştır. Kontrol edilebilen faktörler, ürün üzerindeki etkisi kolaylıkla ayarlanabilen faktörlerdir (Taguchi ve Wu, 1979). Üretim metodu, kullanılan malzeme, makine... kontrol edilebilen faktör gruplarını oluşturur. Kontrol edilemeyen ya da gürültü faktörleri ise ürün üzerindeki etkilerinin ayarlanmasının ya çok zor ya da maliyetli olan



faktörlerdir. Bu durumda kontrol edilebilen faktörlerin en iyi kombinasyonunu elde ederek kontrol edilemeyen faktörlerin değişkenlik üzerindeki etlileri minimum yapılabilir.

3. **Ortogonal Dizilerin (OA) Kullanımı:** Ortogonal diziler, deneme için gereken çalıştırma sayısını veya kombinasyonlarını en aza indirmek için kullanılır. Taguchi metodunun yalnızca OA uygulamasına ve deney sonuçlarının analizine odaklandığı düşünülmektedir. Oysa bu durum çalışmanın sadece bir bölümünü oluşturmaktadır.

4. **İki adımlı optimizasyon:** Deneyleri yaptıktan sonra, optimal tasarım için faktör seviyesi kombinasyonu, iki adımlı optimizasyon yardımıyla seçilir. İlk adım, değişkenliği en aza indirmektir. S / N oranları ne kadar yüksek ise değişkenlik o kadar düşüktür. İkinci adımda, hassasiyet, işlem ayarı ile faktör seviyeleri istenen seviyeye ayarlanır. Asıl zorluğun olduğu değişkenliği en aza indirgedikten sonra ayarı yapmak daha kolaydır.

5. **Kalite kayıp fonksiyonu ve çevrimiçi kalite mühendisliği:** Bu yön, tolerans tasarımı ve çevrimiçi kalite mühendisliği ile ilgilidir. Parametre tasarımı kullanarak en iyi faktör ayarları belirledikten sonra tolerans ayarları, kalite kaybı fonksiyonu yardımıyla yapılır. Performans hedeften saparsa, sapma ile ilgili bir kayıp oluşur. Bu kayıp "topluma zarar" olarak etki eder ve sapmanın karesi ile orantılıdır. Güvenlik faktörlerinin bu yaklaşımı kullanarak tasarlanması önerilir. Çevrimiçi kalite mühendisliği, işlem performansını izlemek ve süreçteki değişiklikleri saptamak için kullanılır.

## 2.4. Kalite Mühendisliğinde Kullanılan Temel Kavramlar

### 2.4.1. P-Diyagramı (Parametre Diyagramı)

Bir ürünü, işlemi veya sistemi temsil etmede kullanılan blok diyagramlarıdır. Ürün, işlem veya sistem ile ilgili giriş sinyali, çıkış tepkisi, kontrol edilebilen ve edilemeyen faktörlerin tamamı diyagramda görülür (Şekil 2.2) (Taguchi v.d., 2004). Taguchi metodunda kullanılan enerji dönüşümü girdi sinyali ile çıktı yanıtı arasında gerçekleşir. Amaç, kontrol edilebilen faktörlerin en iyi seviye ayarlarını kullanarak gürültü faktörlerine karşı enerji dönüşümünü en üst düzeye çıkarmaktır.



Şekil 2.2. Parametre Diyagramı (P-Diyagramı) (Taguchi v.d., 2004)

Sinyal faktörleri, hedef değere ulaşmak veya istenilen çıktıyı ifade etmek için kullanıcı / operatör tarafından ayarlanır. Örneğin, direksiyon açısı bir otomobilin direksiyon mekanizması için sinyal faktörüdür. Sinyal faktörleri, mühendis tarafından mühendislik bilgisine dayalı olarak ta seçilebilir. Bazen birden fazla sinyal faktörü birlikte kullanılır; örneğin, kaba ayarlama için ayrı bir sinyal faktörü, hassas ayarlama için ayrı bir sinyal faktörü kullanılabilir.

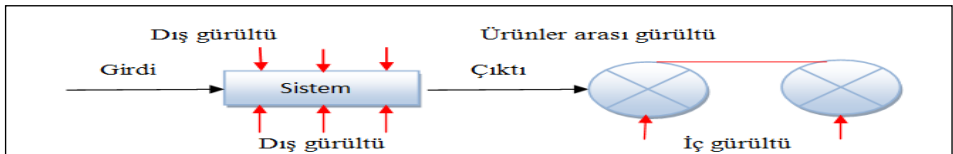
Kontrol faktörleri, değerleri tasarımcının sorumluluğunda olan ürün parametreleridir. Her kontrol faktörü, seviye olarak ifade edilen birden fazla değer alabilir. Nitel kontrol faktörlerinde en az üç seviye, nicel kontrol faktörlerinde ise iki seviye alınması Taguchi tarafından tavsiye edilmektedir. Tasarım faaliyetinin amacı, ürünün gürültüye karşı duyarsız veya sağlam olmasını sağlayacak bu faktörlerin seviyelerini belirlemektir. Bir başka ifadeyle sağlamlık, gürültü faktörlerine karşı duyarsızlaşmadır.

Gürültü faktörleri yüksek maliyet veya diğer sebeplerle kontrol edilemeyen faktörlerdir. Isı, nem, yıpranma... Hedeften sapmaya neden olan ve dolayısıyla kayba neden olan faktörler olarak (Taguchi, 1986), (Park, 1996), (Ross, 1996) ve (Wu ve Wu, 2000) tarafından tanımlanan gürültü faktörleri basitçe değişim kaynakları olarak ta adlandırılır. Bu faktörler çıktıyı etkilerler ve seviyeleri ürünün bir biriminden diğerine, bir ortamdan diğerine ve zamana bağlı olarak değişir. Taguchi gürültü faktörlerini şu üç tipten biri veya bunların bir kombinasyonu olarak belirtir (Şekil 2.3) (Baynal, 2003)

1. **Dış gürültü (Outer noise):** bir ürünün performansını dışarıdan etkileyen değişkenlerdir. Sıcaklık, nem, basınç, voltaj, toz ve titreşimler gibi çevresel faktörlerdeki değişiklikler ve ürünü çalıştırmada insan çeşitliliği başlıca dış gürültü faktörleridir.

2. **İç gürültü (Inner noise):** İç gürültü kaynakları, üretilen bir ürünün gerçek özelliklerinin ilgili nominal ayarlardan sapmasıdır. Başlıca iç gürültü kaynaklarına örnek olarak imalat kusurları, renk solması, yıpranma ve ürün bozulması verilebilir.

3. **Ürünler arası gürültü (Between product noise):** Bölümden bölüme farklılıklar.



Şekil 2.3. Kontrol Edilemeyen (Gürültü) Faktörlerinin Etkisi (Baynal, 2003)

Bazen dış gürültü kaynakları, nominal ayarlardan ürünün fiili özelliklerinin sapmalarını arttırarak ürünün performansını dolaylı olarak etkiler. Örneğin, yüksek sıcaklık ve nem bir ürünün daha hızlı bozulmasına neden olabilir. Bu sapmalar iç gürültü kaynaklarıdır. Bu nedenle, bir ürünün performansı iç gürültü kaynaklarına duyarsız ise, dış gürültü kaynaklarının seviyesini artırarak performansı etkileyen iç gürültü kaynaklarına duyarsız olacaktır.

Fiziksel sınırlamalar nedeniyle ve bilgi eksikliği yüzünden bir parametre tasarım deneyine tüm gürültü kaynakları dâhil edilemez. Parametre tasarım deneyinde bulunabilecek gürültü faktörleri, bir ürünün sahadaki performansını etkileyen değişim kaynaklarını temsil etmelidir. Parametre tasarımı ancak bu şartlarda mümkündür çünkü iç ve dış gürültü faktörlerinin etkileri tasarım parametrelerinin ayarlarıyla değişebilir. Bu üç büyük gürültü kaynağı ile gürültüyü gidermek için firmaların uygulamaları gereken stratejiler arasındaki ilişki Tablo 2.1' de görülmektedir (Taguchi, 1993(b)).

**Tablo 5.1.** Gürültü Kaynakları ve Her Bölümün Gürültüyü Yönetme Stratejileri (Taguchi, 1993(b))

| Gürültüler                                                                             |                      |     |    |               |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-----|----|---------------|
| Bölüm                                                                                  | Strateji             | Dış | İç | Ürünler arası |
| Teknoloji Bölümü-Off line Bölümler                                                     |                      |     |    |               |
| Tasarım ve Geliştirme                                                                  | Yenileme             |     |    |               |
|                                                                                        | Sistem Tasarımı      | R   | R  | R             |
|                                                                                        | Parametre Tasarımı   | R   | R  | R             |
|                                                                                        | Tolerans Tasarımı    | N   | R  | R             |
| Üretim Teknolojisi                                                                     | Yenileme             |     |    |               |
|                                                                                        | Sistem Tasarımı      | X   | X  | R             |
|                                                                                        | Parametre Tasarımı   | X   | X  | R             |
|                                                                                        | Tolerans Tasarımı    | X   | X  | R             |
| On-line Bölümler                                                                       |                      |     |    |               |
| İmalat                                                                                 | Yenileme             |     |    |               |
|                                                                                        | Proses Yönetimi      | X   | X  | R             |
|                                                                                        | Ürün Yönetimi        | X   | X  | R             |
| Pazarlama                                                                              | Yenileme             |     |    |               |
|                                                                                        | Satış Sonrası Servis | X   | X  | X             |
| R:Belirtilen stratejiyi kullanarak bu bölümde bu tür gürültünün etkileri azaltılabilir |                      |     |    |               |
| N:Gürültü etkileri azaltılabilir ancak bu aşamada tavsiye edilmez                      |                      |     |    |               |
| X:Belirtilen stratejiyi kullanarak gürültü etkisi bu bölümde azaltılamaz               |                      |     |    |               |

Taguchi, kaliteyi sağlamak için yapılan faaliyetlerini ikiye ayırmaktadır.

1. On-Line Kalite Kontrol
2. Off-line Kalite Kontrol

Off-Line kalite kontrol çalışmaları pazar araştırması ile başlayıp ürün ve proses geliştirme ile devam eden, ürün üretilmeden önce yapılan kalite geliştirme faaliyetleridir. Off-line kalite kontrol yöntemleri, ürün geliştirme safhasında ürün ve proses tasarım aşamalarında gerçekleştirilen kalitenin ve maliyetin kontrolünün yapıldığı faaliyetleridir. Çevrim dışı kalite kontrol faaliyetleri olarak da adlandırılan bu faaliyetlerin genel amacı, ürünün üretilebilirliğini ve güvenilirliğini iyileştirmek ve ürün geliştirmeyi sağlamak ve tüm bunları yaparken oluşabilecek maliyetleri azaltmaktır. Yüksek kaliteli ürünlerin önde gelen üreticileri, tasarım incelemeleri, hassasiyet analizleri, prototip testleri, hızlandırılmış ömür testleri ve güvenilirlik çalışmaları gibi off-line kalite kontrol

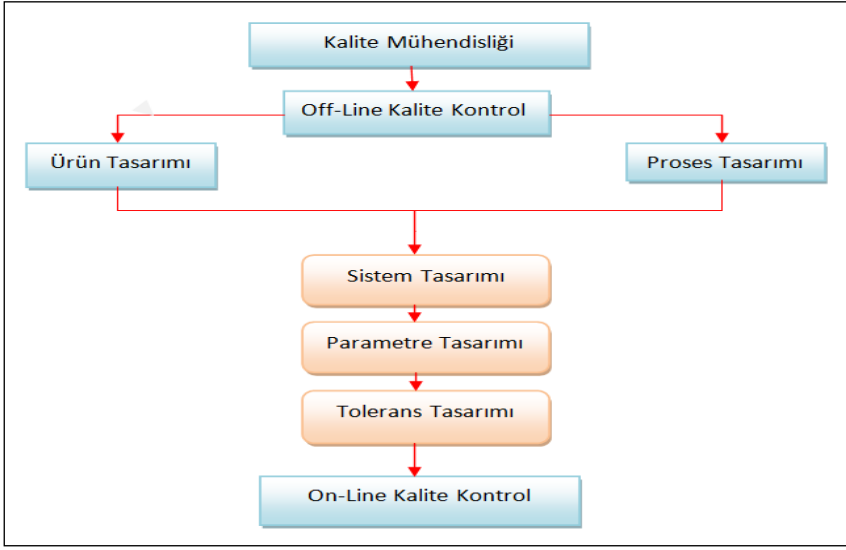
yöntemlerini kullanmaktadır. Bununla birlikte, bu yöntemler ne tam olarak geliştirilmiş ne de on-line kalite kontrol yöntemleri gibi yaygın olarak uygulanmıştır. Pazar payını artırmak ve pazardaki devamlılığını korumak isteyen sanayiciler off-line kalite kontrol yöntemlerini iyi araştırmak zorundadır. Bu aşamada performans farklılıklarını, üretim maliyetlerini düşüren ürün ve süreç tasarım özelliklerini tanımlamak için bilimsel yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Taguchi, ürün tasarımı ve süreç tasarım özelliklerine nominal değerler ve toleranslar atamak için üç aşamalı bir yaklaşımı ortaya koymuştur (Ross, 1996):

1. Sistem tasarımı,
2. Parametre tasarımı,
3. Tolerans tasarımı.

Sistem tasarımı, üründen istenen ve gerekli olan özelliklerin temel alındığı fonksiyonel bir prototip tasarımı üretmek için bilimsel ve mühendislik bilgilerini uygulama sürecidir. Prototip modeli, ürün veya proses tasarım özelliklerinin başlangıç ayarlarını tanımlar. Off-line kalite kontrolün ilk aşamasıdır. Asıl amacı, ürünün belirlenen tolerans sınırları içerisinde ve en düşük maliyetle üretmek için gerekli olan süreci geliştirmektir. Süreç için gerekli olan hammadde, malzeme, ekipman ve üretim teknolojisi de bu aşamada belirlenir.

Parametre tasarımı, performans değişimini ortadan kaldıran veya en azından azaltacak olan ayarları belirlemek için yapılan çalışmalardan oluşan ve Taguchi Metodunun en önemli aşamasıdır. Bir ürün veya süreç tasarım özelliklerinin birçok ayarında istenen işlevi yerine getirebilir. Bununla birlikte, performans karakteristiğinde değişiklikler farklı ayarlarla değişebilir. Bu varyasyon hem ürünün üretim maliyetini hem de ömür boyu kullanım maliyetlerini artırır. Ürün kalitesini etkileyen faktörlerin tespit edilerek kontrol edilemeyen faktörlerin varlığında ürüne olan etkisinin en küçüklenmeye çalışıldığı aşamadır. Taguchi bu çalışmalarda mühendislik ve istatistiği birleştirerek yeni bir yaklaşım geliştirmiştir.



Şekil 2.5. Taguchi Kalite Sağlama Aşamaları (Baynal, 2003)

Tolerans tasarımı, ürün imalatının ve ömür boyu oluşacak maliyetlerin toplamını en aza indireyen toleransların belirlenmesi için bir yöntemdir. Parametre tasarımı yetersiz kalmış ise bu aşamaya başvurulur. Ürün ve süreç tasarımlarını belirlemenin son adımı olan bu aşama parametre tasarımı tarafından belirlenen nominal ayarların etrafındaki toleransları belirlemektir. Toleransları, bilimsel değil, ortak görüşmelerle atamak, endüstride hala yaygın bir uygulamadır. Çok dar toleranslar imalat maliyetini artırır ve çok geniş toleranslar, performans değişimini ve dolayısıyla bir ürünün ömür boyu maliyetini artırır. Bu nedenle Taguchi toleranslarla çalışmak istememektedir ancak zorunlu olan durumlarda kullanılabilir. Taguchi' nin kalite sağlama aşamaları Şekil 2.5' te görülmektedir (Baynal, 2003).

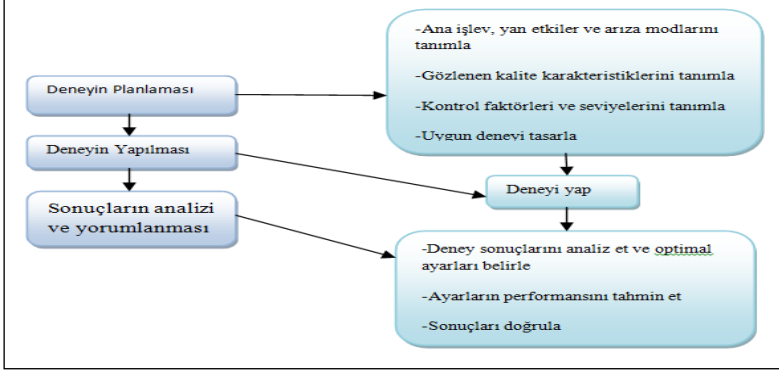
On-Line kalite kontrol ise üretim sırasında ve sonrasında yapılan kalite faaliyetlerini içerir. Üretim süreci boyunca ürünlerin kalitesini periyodik olarak ölçmek için proses yönetim sorumluluğunun da olması gerekir. Kusurlu ürünlerin sebepleri kökten yok edilmeli ve üretim işlemleri normal şartlara göre yeniden ayarlanmalıdır. Proses yönetiminde hem ileri besleme kontrol ve hem de geri besleme kontrolü, bu amaçlara ulaşmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, ürünlerin nesnel özelliklerini ve bu karakteristikleri ölçmek için kullanılan ekipmanı periyodik olarak kontrol etmek, ürün yönetimine kadar sürer. Bu iki strateji süreç yönetimi ve ürün yönetimi kapsamında yapılan faaliyetlerdir.

On-line kalite kontrol yöntemleri çoğu imalat işletmelerinin üretim süreçlerinde yaygın olarak kullanıldığından, üretim teknolojisi departmanları kalite yönetim sistemlerinin tasarımından sorumlu olmalıdır. Birçok imalat

işletmesinde, üretim teknolojisi departmanları on-line kalite kontrol sistemlerini tasarlamak için üretim departmanlarıyla birlikte çalışırlar.

#### 2.4.2. Taguchi Deney Tasarımı – Ortogonal Diziler (OD)

Deneyssel tasarımda, ürün veya süreç performansını etkileyen faktörlerin değerleri veya düzeyleri değiştirilerek ürün veya süreç değişkenliği üzerindeki etkilerini tahmin etmek için sistematik bir biçimde çeşitlendirilir ve böylece sağlam bir tasarım için en uygun faktör seviye kombinasyonu bulunur. Tipik bir deneyssel tasarım döngüsü Şekil 2.6’ da görülmektedir (Taguchi v.d., 2004).



Şekil 2.6. Deney Tasarım Döngüsü (Taguchi v.d., 2004)

Taguchi metodunda ortogonal dizilerin başlıca rolü, mühendislerin, kontrol faktörlerinin ayarlarını değiştirerek gürültüye karşı sağlamlık sağlamak ve düşük maliyetli bir ürün tasarımını değerlendirmesidir. Ortogonal diziler, kötü tasarım’ ın olumsuz etkilerinin akışaşağı (üretim ve pazara) gitmesini önlemek için kullanılan bir denetim cihazıdır. Genellikle ortogonal diziler aşağıdaki gibi gösterilir:

$$L_a(b^n)$$

a: Deneyssel çalışma sayısı

b: Faktör seviye sayısı

c: Dizideki sütun sayısı

L: Latin kare tasarımını ifade etmektedir.

Ortogonal dizilerde en çok karşılaşılan iki ve üç seviyeli faktörlerdir ancak daha fazla seviyede faktörlerde kullanılabilir. Tablo 2.2, 2 seviyeli 3 faktörlü  $L_8$  ortogonal dizisini ve OD’ nin deneme sayısı açısından sağladığı kolaylığı göstermektedir (Taguchi v.d., 2004). Tablodaki diziye en fazla 7 faktör ya da faktör etkileşimi atanabilir. Faktör seviye değerleri birbirinden bağımsız olarak değiştirilebilmelidir. Faktör seviyelerinin belirlenmesinde özellikle ürün ya da

prosesle yakından ilgili olan personelin görüşleri alınır. Bunun için kullanılan özel programlarda vardır.

**Tablo 2.2.**  $L_8(2^7)$  Ortogonal Dizi Örneği ve Tam Faktöriyel Tasarım ile Karşılaştırma (Taguchi v.d., 2004)

| Faktörler | A | B | C | D | E | 6 | 7 |
|-----------|---|---|---|---|---|---|---|
| Deneyler  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1         | - | - | - | - | - | - | - |
| 2         | - | - | - | + | + | + | + |
| 3         | - | + | + | - | - | + | + |
| 4         | - | + | + | + | + | - | - |
| 5         | + | - | + | - | + | - | + |
| 6         | + | - | + | + | - | + | - |
| 7         | + | + | - | - | + | + | - |
| 8         | + | + | - | + | - | - | + |

Tablo 2.3, ise Ortogonal Dizilerdeki deneme sayıları ile tam faktöriyel tasarımlardaki deneme sayılarının bir karşılaştırmasını göstermektedir. Tablodan anlaşılacağı gibi OD' ler deney sayılarını büyük oranda azaltmaktadır (Hamzaçebi ve Kutay, 2003).

**Tablo 2.3.** OD ve Tam Faktöriyel Deney Sayıları Karşılaştırması (Hamzaçebi ve Kutay, 2003)

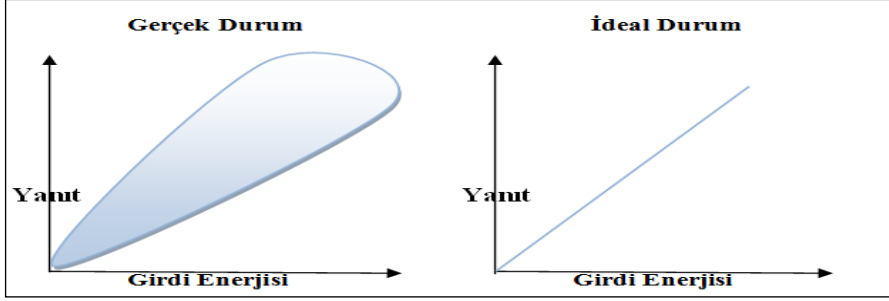
| Ortogonal Dizi | Faktör ve Seviye Sayısı | Tam Faktöriyel Tasarım Deneme Sayısı |
|----------------|-------------------------|--------------------------------------|
| $L_4$          | 3 Faktör ve 2 Seviyeli  | 8                                    |
| $L_8$          | 7 Faktör ve 2 Seviyeli  | 128                                  |
| $L_9$          | 4 Faktör ve 3 Seviyeli  | 81                                   |
| $L_{16}$       | 15 Faktör ve 2 Seviyeli | 32768                                |
| $L_{27}$       | 13 Faktör ve 3 Seviyeli | 1594323                              |

### 2.4.3. Sinyal Gürültü (S/N) Oranları

S / N oranı, kontrol edilemeyen faktörler (yani gürültü) için bir miktar ayar yaptıktan sonra girdinin (yani sinyallerin) büyüklüğünü yakalamaya çalışır. Şekil 2.7 bir sistemin gerçek ve ideal durumlarını göstermektedir. Belirli bir işlemi gerçekleştirmek ve gürültü faktörlerine bağlı işlevsel farklılıkları en aza indirgeyerek istenen bir sonuç üretmek üzere tasarlanmış bir dizi etkinlik veya işlevden oluştuğunu söyleyebiliriz. Mühendislik sistemlerinde girdi enerjisi, fizik kanunları vasıtasıyla amaçlanan bir çıktıya dönüştürülür. Bu mühendislik sistemleri, müşteriler tarafından istenen belirli sonuçlar sunacak şekilde tasarlanmıştır. Tüm mühendislik sistemleri girdi ve çıktı arasında ideal bir ilişki ile yönetilir. Bu ilişki ideal fonksiyon olarak adlandırılır. Sağlam mühendislik yaklaşımı bu ilişkiyi kullanır ve sistemi ideal duruma yaklaştırır (Taguchi v.d., 2004).

Tüm giriş enerjisi çıktıya dönüştürülürse, enerji kaybı olmaz. Sonuç olarak bu durum sağlanabilseydi sarkmalar, bozulmalar, gürültüler, hurda, yeniden işleme, kalite kontrol personeli, müşteri hizmetleri servisi, müşteri şikâyetleri veya

garanti talepleri olmazdı. Ne yazık ki böyle olmaz, çünkü gerçek ideal durumdan çok farklıdır. Gerçekte, girdi bir çıktıya dönüştürüldüğünde enerji kaybı ortaya çıkar. Bu kayıp, değişkenlik ve gürültü faktörleri nedeniyle oluşur. Bu enerji kaybı, istenmeyen durumlara neden olur. Ayrıca, enerji kaybı ne kadar büyükse problemler de o kadar büyük olacaktır. S/N oranı, bir tasarım içinde enerji dönüşümünü ölçtüğü gibi dayanıklılığı da ölçer ve bu ölçüm sonucu desibel (dB) birimiyle ifade edilir.



**Şekil 2.7.** Sistemlerin Gerçek ve İdeal Durumları (Taguchi v.d., 2004)

S/N oranı ne kadar yüksekse, sistemin işlevi o kadar güçlüdür. Taguchi, üç çeşit S/N oranı kullanmaktadır. S/N oranı sistem fonksiyonuna ayarlamalar yaptıktan sonra kalite kaybını tahmin etmek amacıyla kullanılır. Taguchi önerdiği metodunda en büyüklenecek amaç fonksiyonu olarak S/N oranı kullanılmaktadır.

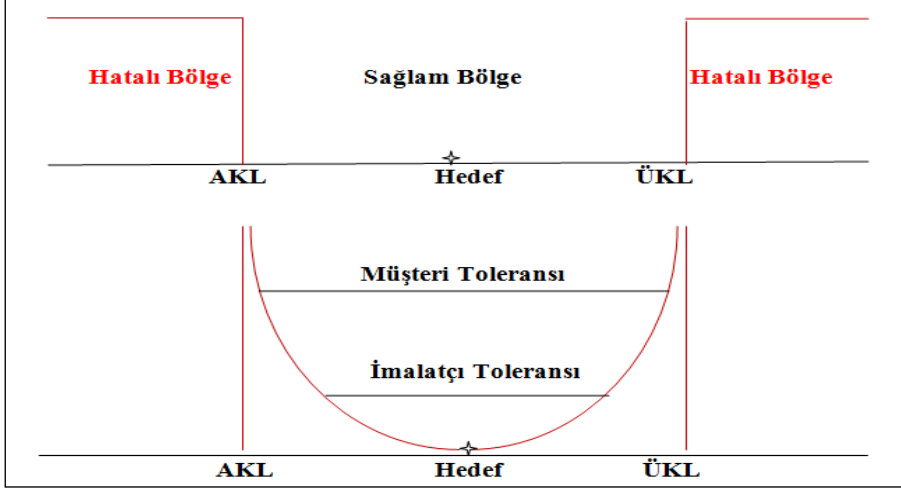
#### **2.4.4. Taguchi Kalite Kayıp Fonksiyonu**

Bir ürünün performans özellikleri, ürünün müşteri gereksinimlerini karşılama kabiliyetini belirleyen birincil kalite özellikleridir. Bir performans karakteristiğinin ideal değeri hedef değer olarak adlandırılır. Yüksek kaliteli bir ürün, ürün ömrü boyunca ve tüm farklı çalışma koşullarında sürekli olarak hedef değerın yakınında performans göstermelidir. Performans karakteristiği sürekli bir ölçekte ölçüldüğünde performans değişimi en etkili şekilde değerlendirilebilir. Bunun nedeni, sürekli ölçümlerin kalitedeki küçük değişiklikleri algılayabilmesidir. Bu nedenle, bir ürünün sürekli bir ölçekte ölçülebilen performans özelliklerini tanımlamak önemlidir.

Bir ürünün performans farklılığından dolayı müşterinin kaybı genellikle performans karakteristiğinin hedef değerinden sapmasının karesi ile yaklaşık olarak orantılıdır. Bir ürünün hedef değeri ile ilgili performans karakteristiğindeki herhangi bir değişiklik, müşteriye zarar verir. Bu kayıp, sadece rahatsızlık duyulması olabileceği gibi para kaybıda olabilir veya daha tehlikeli bir boyuta ulaşp fiziksel zarara kadar müşteriye etkileyebilir.



Optimal parametre ayarlarını tanımlamak, optimize edilecek bir kriter belirlemeyi gerektirir. Böyle bir kriter, beklenen kayıptır - ürünün herhangi bir kullanıcısının, performans değişimi nedeniyle ürünün ömrü boyunca herhangi bir zaman zarfında muhtemel parasal kayıpların beklenen değeri. Performans değişim derecesinin bir ölçüsü beklenen kayıptır. Beklenen kayıp kavramı, performans değişiminin azaltılması gerektiğinin göstergesidir. Ayrıca, farklı performans özelliklerinde varyasyonları karşılaştırmak için ortak bir temel sağlar. Şekil 2.8’ de geleneksel yaklaşım ve Taguchi kalite yaklaşımının grafiksel gösterimidir (Baynal, 2003).



Şekil 2.8. Geleneksel ve Taguchi Kalite Yaklaşım Modelleri (Baynal, 2003)

Taguchi kayıp fonksiyonunu karesel bir formülle ifade etmektedir (2.1). Ürünün seçilen performans karakteristiğine  $y$  diyelim. Belirlenen hedef değer ise  $m$  olsun. Kalite seviyesinin bir göstergesi olarak kullanılan finansal kayıp  $L(y)$  ve  $k$ , sabit olsun.  $Y$ ,  $m$  hedefini karşıladığında  $L(y)$  kalite kaybı minimum olacaktır (Taguchi, 1993(b)).

$$L(y) = k(y - m)^2 \quad (2.1)$$

Kalite kaybı karesel sapmayı yaklaşık olarak kullanarak genellikle rasgele ve normal olarak dağılan olası tüm operasyonel ve gürültü koşullarını dikkate alır. Taguchi’ nin kaliteyi değerlendirmek amacıyla önerdiği hedef esaslı olan kalite felsefesi nominal en iyi durumu etrafında geliştirilmiştir. Taguchi geliştirdiği metotta kalite ve istatistiği birlikte kullanır. Kalite değerlendirme için kullandığı performans istatistiği, gürültü faktörlerinin performans karakteristiği üzerindeki etkisini tahmin eder. Tablo 2.1, Taguchi’ nin önerdiği parametre tasarım deney planının bir örneğidir. Bilindiği üzere etkin bir performans istatistiği, ürün

hakkında daha önceden bilinen mühendislik bilgisinden, kalite kayıp fonksiyonundan ve performans karakteristiğinin dağılımından yararlanılarak oluşturulmalıdır. Bir performans ölçüsü seçilen bir tasarım parametresinin fonksiyonudur, bu şekilde performans ölçümünün maksimum hale getirilmesi olası mühendislik düzenlemeleri ile beklenen kaybı asgariye indirir.

Performans ölçütü, aynı zamanda tasarım parametrelerinin farklı ayarlarını karşılaştırmak için kriter olarak kullanılır. Verimli bir performans ölçütü, ürün hakkındaki mühendislik bilgisinden yararlanılarak ölçüyü olabildiğince basitleştirir ve kalite kayıp fonksiyonunu kullanır. Aslında beklenen kaybın kendisi bir performans ölçüsüdür, ancak bazen mühendislik bilgilerinden faydalanılmadığı için olması gerekenden daha karmaşıktır. Taguchi, parametre tasarımının mühendislik uygulamaları için 60'dan fazla farklı sinyal / gürültü oranını tanımladığını söylemiştir (Kackar 1985, Pignatiello 1988). Taguchi, sinyal-gürültü oranı terimini kullanırken, performans ölçümü teriminin istatistiksel tahmini için performans istatistiği terimini kullanmıştır (Kackar, 1985).

y performans karakteristiği sürekli bir değişken olduğunda, kayıp fonksiyonu  $L(y)$  genellikle daha küçük olanın daha iyi, daha büyük olanın daha iyi olup olmadığına veya belirli bir hedef değerin (nominal) en iyi olduğuna bağlı olarak üç formdan birini alır.

### **1.Daha Küçük Daha İyi Durumu:**

Bu genellikle ideal değerin sıfır olduğu "kusurlar" gibi istenmeyen tüm özellikler için seçilen  $S / N$  oranıdır. Ayrıca, ideal bir değer sonlu ve maksimum veya minimum değeri tanımlandığında (maksimum saflık %100 veya telefon bağlantısı yapmak için minimum süre 1 saniye gibi) o zaman ölçülen verilerle ideal değer arasındaki farkın mümkün olduğunca küçük olması beklenir. Performans istatistiği olarak aşağıdaki formül ile tahmin edilebilir.

$$Z(\theta) = -10 \log \sum_{i=1}^n \left[ \frac{Y_i^2}{n} \right] \quad (2.2)$$

### **2.Daha Büyük Daha İyi Durumu:**

y performans karakteristiği, negatif olmayan bir dağılıma sahiptir, hedef değeri sonsuzdur ve y, sıfırdan arttıkça  $L(y)$  kayıp fonksiyonunun değeri azalır. Performans istatistiği olarak aşağıdaki formül ile tahmin edilebilir.

$$Z(\theta) = -10 \log \left( \sum (1/y_i)^2 / n \right) \quad (2.3)$$

### 3.Nominal En İyi Durumu:

Bu durum, belirlenen bir değerin en çok arzu edildiğinde ortaya çıkar; yani ne daha küçük ne de daha büyük bir değer arzulanır. Örnek verecek olursak;

1. Mekanik bağlantı parçaları içerisindeki çoğu parçanın ölçü olarak nominal olarak en iyi olması istenir.

2. Kimyasalların veya karışımların oranları nominal olarak en iyi tiptir.

3. Kalınlık, büyüme, kaplama, aşındırmada değerler belirli bir hedef değere eşit olmalıdır.

4. İlaçlarda bulunan maddelerin oranları belirlenen hedef değere eşit olmalıdır.

Bu durumda Taguchi' nin kullanmayı önerdiği performans istatistiği olan sinyal gürültü oranı şu şekildedir:

$$Z(\theta) = -10 \log(s^2) \quad (2.4)$$

$$s^2 = \sum (y_i - \bar{y})^2 / (n-1) \quad \bar{y} = \sum y_i / n$$

### 3. TAGUCHI METODUNDA TASARIM PROBLEMLERİN SINIFLANDIRILMASI

Tasarım problemleri, sırasıyla sinyal faktörlerinin yokluğuna veya varlığına bağlı olarak statik ve dinamik problemler diye sınıflandırılabilir (Dehnad, 1989). Başka bir önemli kategori daha vardır - yaşam iyileştirme problemleri. Statik ve dinamik problemler, sinyal faktörünün ve tepki değişkeninin niteliğine bağlı olarak da sınıflandırılabilir. Aşağıda verilen tasarım problemlerinin sınıflandırılması piyasada olan tüm problem gruplarını kapsamamasına rağmen bu sınıflar farklı endüstrilerde karşılaşılan mühendislik problemlerinin büyük çoğunluğunu kapsamaktadır. Taguchi de bazı durumlarda, S/N oranlarının ayrıntılı olarak türetilmesi gerektiğini, diğer durumlar için daha önce önerdiği S/N oranlarının kullanılabileceğini belirtmiştir (Taguchi, 1993a). İstatistiksel literatürde parametre tasarımı ile ilgili çalışmaların çoğunluğu statik uygulamalara odaklanmıştır (Box, 1988). Phadke, 1989 ve Grove ve Davis' in 1992 yılında yaptığı gibi bazı çalışmalar haricinde dinamik problemlerle ilgili çok az sayıda çalışmaya rastlanabilir. Bu nedenle bu konu ile ilgili çalışmalar bilime örnek teşkil edecektir.

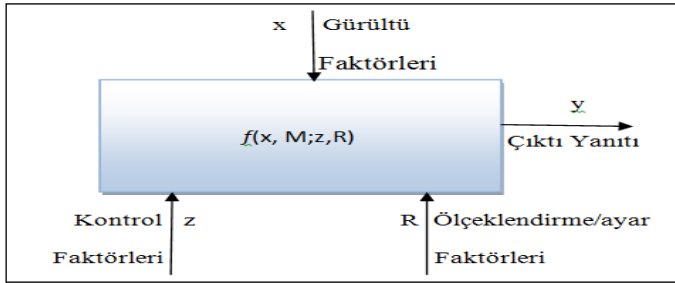
#### 3.1. Statik Problemler

Statik karakteristik uygulamalarının ana amacı, sürecin direkt belirlenen tek bir hedefe, Y veya istenilen hedef değere mümkün olan en yakın değere birden

fazla kontrol edilebilen faktörün optimize edilmesi ile ulaşılmaya çalışılmasıdır. Optimizasyon hedeflenen çıktı değerini sağlayacak en iyi kontrol edilebilen faktör seviyelerinin belirlenmesini içerir. Bu çalışmalar yapılırken çıktı yanıtını etkileyen herhangi bir girdi sinyalinin varlığı dikkate alınmaz.

Kackar ve Shoemaker'ın 1986 yılında yaptığı çalışma statik karakteristik uygulamalarının ilklerindendir. Silikon katmanlarının üzerine ilave silikon tabakası ekleyerek daha önceden belirlenmiş tabaka kalınlığına ulaşmak için (14,5 mikrometre) bir dizi kontrol edilebilen faktörün en iyi seviyelerini belirlemişlerdir. Bu statik parametre tasarım uygulaması ile maliyette düşüş kalitede ise sağlam bir yapı elde etmişlerdir. Taguchi ve bazı araştırmacıların statik karakteristik dediği bu tip uygulamalara Wu ve Miller Basit Yanıt Sistemi ( Simple Response System) adını vermektedir (Wu ve Miller, 1996).

Bu sistemi Şekil 3.1' de gösterilen P-diyagramı (P- süreç veya ürün anlamındadır) ile açıklayabiliriz. Gürültü, proses ya da üründe mevcuttur fakat çıktı üzerinde direkt bir etkiye sahip olmamaktadır. Gürültü süreçte var olmasına rağmen çıktı varyasyonlarını minimize etmek Taguchi deneylerinin öncelikli amacıdır. Daha öncede açıklandığı gibi bu şekilde prosesin sağlam (robust) hale gelmesi amaçlanmaktadır. Ülkemizdeki çalışmalar incelendiğinde görülmüştür ki yayınlanan çalışmaların tamamı Taguchi' nin statik karakteristikler için geliştirdiği bu tip çalışmalardır.



Şekil 3.1. Statik Problemler için P-Diyagramı (Wu ve Miller, 1996)

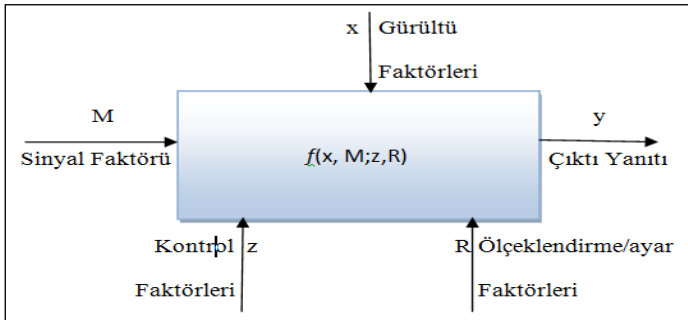
Değerlendirmelerde kullanılan sinyal-gürültü oranları daha öncede belirtildiği gibi statik problemlerin optimizasyonunda yaygın olarak kullanılan S/N oranıdır; Daha küçük daha iyi, daha büyük daha iyi ve nominal en iyi tip S/N oranları.

### 3.2. Dinamik Problemler

Taguchi' nin sağlam parametre tasarımında uyguladığı ikinci tip, 'dinamik problemler' ya da Wu' nun ifadesiyle 'sinyal-yanıt sistemleri' dir. Miller ve Wu, dinamik teriminin yanıltıcı olduğunu düşünmektedir. Dinamik sistemde, sistemin istenen çıktısı, sinyal faktörü ayarına bağlıdır, yani, dinamik sistem tek bir hedef olmayan ancak bir sinyalin bir işlevi olan bir yanıttır. Böyle bir probleme

"dinamik problem" denir (Wu ve Miller, 1996). Dinamik problem uygulamaları sistem performansının bir sinyal faktörü,  $M$ , ile gözlenen yanıt,  $Y$ , arasındaki ilişki tarafından belirlendiği durumları içerir. En iyilenmesi gereken ürün doğrudan çıktıyı etkileyen bir sinyal girdisine sahipse, optimizasyon, girdi sinyali/çıktı oranı ile kurulmak istenen ilişkiye en yakın olacak şekilde en iyi faktör seviyelerini belirlemeyi amaçlar (Tsai ve diğerleri, 2009). Bu tür uygulamalarda yanıtın sinyal faktöründeki değişikliklerin bir sonucu olarak farklı değerler aldığı varsayılır. Örneğin; su içindeki kalsiyum miktarını belirleme probleminde farklı kalsiyum oranları farklı özelliklerde su elde edilmesine neden olur. Dolayısıyla yanıt olarak tek bir değerden bahsedilemez (Wu ve Miller, 1996). Pek çok mühendislik sisteminde sinyal-yanıt sistemlerine benzeyen durumlar vardır. Bu nedenle Taguchi' nin dinamik sistemler için önerdiği metodoloji mühendislik uygulamalarında giderek artan bir öneme sahip olacaktır. Otomobillerdeki gaz pedalı, ses amplifikatörlerindeki (işitme cihazlarındaki) ayar düğmeleri, fotokopi makinaları (büyütme ya da küçültmeli), farklı kalıp tipleri... v.s. dinamik problemlere verilebilecek diğer örneklerdir.

Dinamik problemler yeterli ve detaylı bir şekilde açıklandığında mühendislik uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaya başlayacaktır (Wu ve Miller, 1996). Ülkemizde dinamik problemlere yönelik çalışma yapılmamıştır. Sinyal-yanıt sistemlerinin P diyagramlarını Şekil 3.2' de görebiliriz (Dehnad, 1989). Taguchi deneylerinin birincil amacı, süreçte gürültü mevcut olmasına rağmen çıktıdaki varyasyonları en aza indirmektir. Dinamik problemlerde çıktının önceden belirlenmiş bir girdi sinyalini takip ettiği pek çok örnek ile karşılaşırız. Böyle durumlarda genellikle, "girdi" ve "çıktı" arasında doğrusal bir ilişki arzu edilir. Bu ilişki dinamik modellerde girdi ve çıktı (sinyal ve yanıt) arasındaki doğrusal ilişki adım adım düzeltilerek elde edilir.



**Şekil 3.2.** Dinamik Problemler (Sinyal-Yanıt Sistemleri) için P-Diyagramı (Dehnad, 1989)

Wu ve Miller, sinyal-yanıt sistemlerini iki farklı sınıfta toplamışlardır (Wu ve Miller, 1996).

Birincisi, çoklu hedef uygulamalarıdır (Multiple Target Applications). Bu gruba örnek olarak Yano' nun torna tezgâhında işlenen parçalar ile ilgili yaptığı çalışmayı verebiliriz (Yano, 1991). Tornada işlenen parçalarla ilgili olarak yüzey pürüzlülüğü yanıt değişkeni olarak kabul edilmiştir. Farklı besleme hızları farklı pürüzlülük oranlarına sebep olduğu için besleme hızı sinyal girdisi olarak kabul edilmiştir. Besleme hızının ayarlanması ile yüzey pürüzlülüğü güvenli bir şekilde kontrol edilebildiği için ikisi arasındaki ilişki doğrusaldır. Bunun yanında deneyde kesme kenar açısı, ön kaçış açısı, kesme tipi... gibi kontrol edilebilen faktörlerin de bu ilişkiye etki edebileceği düşünülerek deney tasarlanmış ve yapılmıştır.

İkincisi, ölçüm sistemleridir (Measurement Systems). Bir ölçüm sistemi, belirli bir birim ya da bir örneğin belirli bir miktarı için tahmini bir değer elde etmek amacıyla kullanılan bir işlemdir. Örnekleme işlemi, örnek hazırlama, kalibrasyon ve aynı zamanda gerçek ölçüm işlemini içerebilir. Bir ölçüm sisteminin amacı, belirli bir ilgili miktarın bir tahminini elde etmek olduğundan, sistemin elde edilen tahminlerin hassaslığına göre değerlendirilmesi gerekir. Doğru kabul edilen miktar girdi sinyali (M) olarak düşünülür, sistem bunu gerçek bir ölçüm değerine (Y) dönüştürür. Girdi sinyali olan M' ye göre hassas bir şekilde tahmin edilen Y; M ve Y arasındaki ilişkinin özelliklerine göre belirlenir (Wu ve Miller, 1996).

Statik problemlerde toplu süreç iyileştirme yapılırken dinamik problemlerde genellikle teknoloji geliştirilmeye çalışılır. Dinamik modellerde 'Lideri takip etme' veya 'dönüştürme' diye de adlandırılan uygulama tiplerinde en yaygın olarak kullanılan 2 özellik vardır. Bunlar;

**1.Duyarlılık (Eğim):** Girdi/Çıktı karakteristiklerinin eğimi daha önceden öngörülen bir değerde olmalıdır (genellikle 1). Çıktı belirlenen özelliklerde olduğu zaman (Örneğin, sensörlerde olduğu gibi, eğimi göstermektedir) daha büyük-daha iyi tercih edilir.

**2.Girdi/çıkı (I/O) karekteristiklerinin doğrusallığı** (En iyi olarak belirlenmiş doğrusal hattan minimum sapma): Çoğu dinamik karakteristiklerin girdisi ve çıktısı arasındaki ilişkinin direkt orantılılığa sahip olması gerekir. Bu nedenle bu uygulamalar dönüştürme (Transformations) olarak adlandırılır. I/O arasındaki ilişki gerçekten doğrusal olmalıdır. Yani doğrusal hattan sapma mümkün olduğu kadar minimum olmalıdır.

### 3.2.1. Dinamik Problemlerde Sınıflandırma

Dinamik problemlerde, bir ürün veya sürecin optimize edilmesinde yanıtı doğrudan etkileyen bir girdi sinyali varsa, optimizasyon "girdi/çıktı" oranı kurulmak istenen ilişkiye en yakın olacak biçimde, en iyi kontrol faktörü seviyelerini belirlemeyi içerir. Dinamik sistemler dört gruba ayrılır:

- 1- Sürekli-sürekli
- 2- Sürekli-dijital
- 3- Dijital-sürekli
- 4- Dijital-dijital

#### 1. Sürekli-Sürekli [Continuous-Continuous (C-C tipi)]

C-C tipi dinamik sistemde kalite karakteristiği olan Y genellikle sinyal faktörü olan M' nin bir fonksiyonu olarak kabul edilir. Y ve M' nin her ikisi de pozitif ya da negatif değerler alabilir. M sinyalinin değeri 0 olduğunda kalite karakteristiği olan Y' nin değeri de 0 olur. İdeal fonksiyon  $Y=M$  şeklindedir. Bütün bu açıklamalardan sonra Taguchi, sürekli-sürekli tip dinamik kalite karakteristikleri için SN oranını aşağıdaki şekilde formülize etmektedir (Taguchi, 1993).

$$\eta = -\log Q_a(z) = 10 \log \frac{\beta^2}{\sigma_e^2} \quad (3.1)$$

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{mn-1} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \beta M_i)^2 \quad (3.2)$$

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n y_{ij} M_i}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n M_i^2} \quad (3.3)$$

Taguchi sürekli-sürekli tip dinamik kalite karakteristiklerinin optimizasyonu için iki adımlı bir prosedür önerir ki bu statik kalite karakteristiklerinin optimizasyonunda kullanılan Nominal En İyi yaklaşımına benzerdir.

**Birinci adım;** Sinyal-gürültü oranının maksimizasyonudur.

**İkinci adım** ise; eğimin daha önceden belirlenmiş olan değere uygun bir ölçekleme (scaling) faktörü ile ayarlanmasıdır. Eğim üzerinde büyük bir etkiye sahip olan herhangi bir kontrol faktörünün  $\eta$  üzerinde ölçeklendirme faktörü olarak herhangi bir etkiye sahip değildir.

#### 2. Sürekli-Dijital [Continuous-Digital (C-D tipi)]

Sürekli-dijital tip dinamik problemlerde girdi sürekli iken çıktı kalite karakteristiği ayrıktır. Örneğin; sıcaklık kontrolöründe sıcaklık ayarı olan girdi sürekli iken ısı birim çıktısı ‘ON’ ya da ‘OFF’ değerlerini alarak dijital yani ayrık bir durum gösterir. Böyle problemler iki ayrı bölüme ayrılarak çözümlenir. Biri ‘ON’ diğeri ‘OFF’ için iki ayrı fonksiyon şeklinde ele alınır. Bu iki grubun her biri ya sürekli-sürekli tip ya da nominal en iyi tip problemler gibi çözülür.

### 3. Dijital- Sürekli [Digital- Continuous (D-C tipi)]

Bu tip problemler dijitali analoğa çevirme ile benzerlik gösterir. 0 ve 1’ in karşılık geldiği sürekli değerlere dönüştürülmesi problemidir. Sürekli-dijital tip problemlerde olduğu gibi iki ayrı fonksiyon olarak ele alınır: Biri ‘0’ için diğeri ‘1’ için olacak şekilde iki fonksiyon oluşturulur veya sürekli-sürekli tip ya da nominal en iyi problemler şeklinde çözümlenir.

### 4. Dijital-Dijital [Digital- Digital (D-D tipi)]

Sinyal faktörü ve kalite karakteristiğinin her ikisi de dijitaldir. İdeal fonksiyonda 0 iletildiği zaman 0 alınmalı 1 iletildiği zaman da 1 alınmalıdır. Dijital haberleşme sistemleri ve bilgisayar işlemleri dijital-dijital tip problemlere örnek olarak verilebilir. Dijital-dijital tip problemlerde test etmek için sinyal değerleri  $M_0 = 0$  ve  $M_1 = 1$  olarak alınır. Kontrol edilebilen faktörlerin ve gürültü koşullarının belli ayarları altında p, 0 iletildiği zaman 1 gönderme ihtimalini; q ise 1 iletildiği zaman 0 gönderme ihtimalini temsil etmektedir. Eğer 0 ve 1 iletiminde hatalar var ise -yani eşit değilse- bir haberleşme sisteminin verimsiz olduğunu herkes bilir. Taguchi p’ yi q’ ya eşitleyerek daha etkin bir iletim yapılacağını söylemektedir. Taguchi iki hata olasılığını eşit hale getirmek için aşağıdaki formülü kullanmaktadır ( $p' = q'$ ). Dijital-dijital tip problemlerde iletilen sinyalin eğimi (0.5,0.5) noktasından geçer.  $\beta$  eğimi ve  $\eta$  sinyal-gürültü oranı formülleri aşağıdadır:

$$\beta = \frac{0.5 - p'}{0.5} = 1 - 2p' \quad \eta = -\log Q_a(z) = 10 \log \frac{(1 - 2p')^2}{p'(1 - p')} \quad (3.4)$$

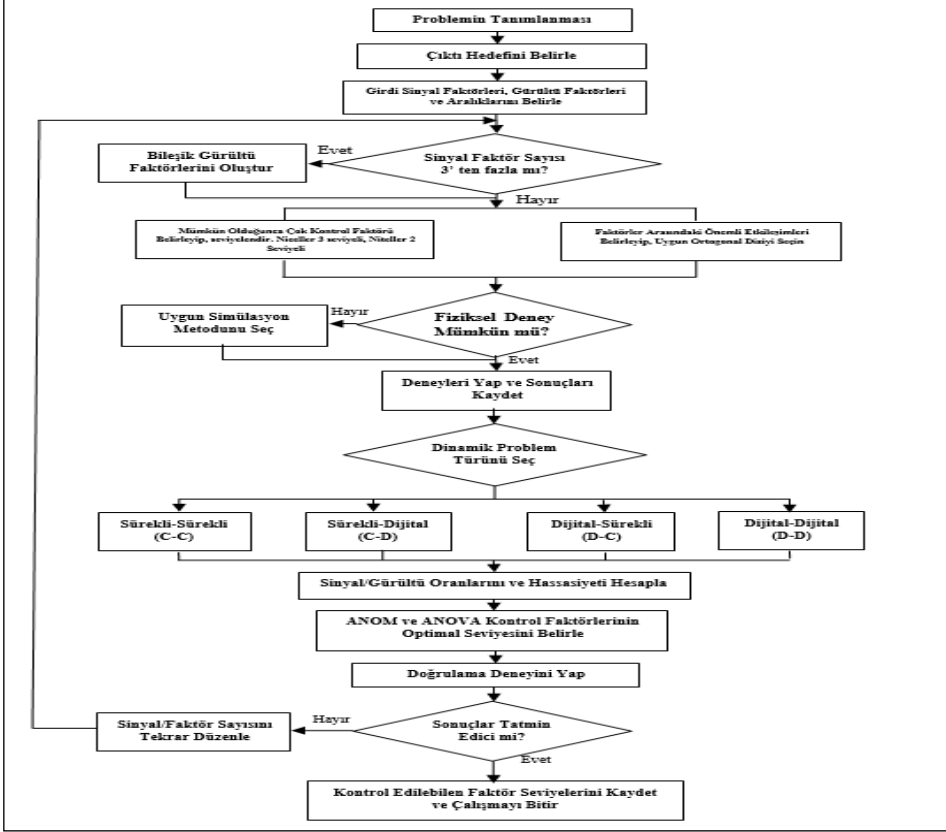
Böylece bir D-D sisteminin optimizasyon stratejisi  $\eta$  üzerinde herhangi bir etkisi olmayan bir kontrol faktörü (ayarlama faktörü) kullanılarak  $\eta$ ’ nin optimizasyonudur. Ancak hata olasılıklarını eşitlemek için p:q oranı değiştirilebilir.

### 3.3. Taguchi Metodu Dinamik Sistemlerin Optimizasyon Stratejisi

Herhangi bir alandaki problemlerin çözümü ya da ürün/süreç geliştirilmesi için sistematik bir yaklaşımın olması kolaylık sağlar. Uygulanması önerilen metot



ile ilgili gerekli tüm adımları kapsayan bir yaklaşım son derece faydalıdır. Dinamik problemler için Taguchi eniyileme prosedürü Şekil 3.3’ te görülmektedir.



Şekil 3.3. Dinamik problemler için Taguchi eniyileme prosedürü (Taphasanoğlu, 2020)

Taguchi dinamik sistemleri için eniyileme prosedürü adımları şu şekilde sıralanabilir:

**Adım 1:** Problemin tanımlanması

**Adım 2:** Hedefin ya da hedeflerin belirlenmesi

**Adım 3:** Girdi sinyal faktör/faktörlerinin, gürültü faktörlerinin ve aralıklarının tespit edilmesi. Sinyal faktör sayısı ikiden fazla ise işlem yükünün azaltılması için sinyal faktörlerinin tamamını dikkate alarak gürültü faktörlerinin 2 ya da 3 seviyeli olarak birleştirin.

**Adım 4:** Kontrol edilebilen faktörleri seçin. Kontrol edilebilen faktörler ile yanıt değişkenleri arasında korelasyon olması gerektiğini unutmayın. Faktör seçimleri uzman bir ekiple ve çeşitli metotlarla yapılabilir. Faktör sayısı ne kadar

çok olursa sonuçların güvenilirliği o kadar yüksek olur. Faktör seviyelendirmede Taguchi nitel faktörler için 2 seviye, nicel faktörler için ise 3 seviye önermektedir. Ayrıca faktörler arasındaki önemli etkileşimleri belirleyin.

**Adım 5:** Deney tasarımı yapın. Sinyal ve gürültü faktörleri dış diziye, kontrol edilebilen faktörleri ve varsa etkileşimleri iç diziye atayın. Eğer deney maliyeti yüksek ya da deneyin fiziksel olarak yapılması mümkün değilse simülasyon deneylerini gerçekleştirin.

**Adım 6:** Deneyleri yapın ve sonuçları kaydedin.

**Adım 7:** Uygun dinamik problem türüne göre S/N oranlarını ve hassasiyeti ( $\beta$ ) hesaplayın.

**Adım 8:** En iyi kontrol faktörü seviyelerini belirleyin. ANOM ve ANOVA ile sonuçları teyit edin.

**Adım 9:** İki aşamalı optimizasyonu uygulayın. Birinci aşamada S/N oranının en büyükleyen kontrol faktör ayar setini bulun. İkinci aşamada S/N oranı üzerinde etkili olmayan anca hassasiyet üzerinde etkisi yüksek olan ayarlama faktörünü kullanarak eğimi hedef değere ayarlayın.

**Adım 10:** Optimal faktör ayar setini kullanarak doğrulama deneyini yapın. Taguchi doğrulama deneylerinin mutlaka fiziksel deneyler olması gerektiğini belirtmektedir.

**Adım 11:** Sonuçlar tatmin edici düzeyde değilse başa dönüp faktörlerin ve düzeylerinin yeniden belirlenmesi ve çalışmaların baştan yapılması gerekir.

**Adım 12:** Sonuçlar tatmin edici düzeyde ise sonuçları değerlendir, optimal faktör ayarlarına uygun çalışmaları takip edin.

## 4. UYGULAMA

### 4.1. İdeal Fonksiyon Tanımlanması

Taguchi dinamik sistemlerde girdi sinyali ve çıktı yanıtı arasında doğrusal ilişki fonksiyonunun tanımlanması gerekir. Bu çalışma için ideal ilişki fonksiyonu aşağıda tanımlanmıştır.

$$Y_{ijk} = \beta_i M_j + \varepsilon_{ijk}$$

$Y_{ijk}$  = i. kontrol faktör ayarı (i. deney), j. sinyal seviyesi, k. gürültü faktör ayarındaki yanıt

## 4.2. Deneylerin Yapılması ve Verileri Analizi

Deneyler, sıralaması rasgele seçilerek hattın otuz iki kanalının her seferinde farklı bir kanalında toplam yedi aylık sürede tamamlanmıştır. Deneyler yapılırken kurucu firmanın üç mühendisi bizzat deneyleri takip etmiştir. Ölçümler yapılmadan ölçüm cihazlarının kalibrasyon işlemleri tamamlanmıştır.

Çalışmada üç seviyeli bir sinyal faktörü, iki seviyeli üç gürültü faktörünün olduğu dış dizi ( $L_4(3^1 \times 2^3)$ ) ve beşi üç seviyeli beşi iki seviyeli toplam on kontrol edilebilen faktörün atandığı 18 deneme içeren iç dizi de üç tekrar ile toplam 648 ( $18 \times 4 \times 3 \times 3$ ) deney yapılmıştır. Her deneyde toplam 3 ölçüm yapılarak deney sonuçlarına elde edilen değerlerin ortalaması yazılmıştır. Eşit sayıda kıyaslama yapılamayan deneylerde aynı şartların korunması amacıyla deney sayısı artırılmış ve ölçüm değerleri de artırılarak tüm kombinasyonların aynı sayıda olması sağlanmıştır. Her bir denemede gürültü şartlarına uygun olarak bir kangal filmaşın kangal bitene kadar hatta tutulmuş ve kangal başından ve sonundan 10 metrelik kısım istisna olmak kaydıyla üç ve bazen 6 parça tel yaklaşık birer metre olacak şekilde kesilmiş ve kodlanarak kalite kontrol bölümünde gerekli ölçümler yapılmıştır. Deney yapılan kangallar sarıcı kısmında ilgili deney numarası ile ayrı bir alanda depolanmış ve yüzey pürüzlülüğü için hem alınan tel numuneleri hem de kangallar 11 kişilik ekip tarafından değerlendirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için nitel değerler olan kötü, iyi ve çok iyi kriterleri analiz işlemlerinin sayısal olarak yapılabilmesi amacıyla metrik değerlere dönüştürülmüştür (0, 1, 2).

## 4.3. Kalite Kayıplarının Hesaplanması

Taguchi dinamik sistemlerinde statik sistemlerde olduğu gibi ölçüm sistemi olarak kalite kaybı kullanılır. Statik sistemlerden farklı olarak kalite kaybı 4.1' deki gibi formüle edilmiştir. (4.2), hata varyansını; (4.3) ise  $\beta$  eğimini göstermektedir.

$$L_{IJ} = K \frac{\sigma_e^2}{\beta^2} \quad (4.1)$$

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{mn-1} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_{ijk} - \beta M_i)^2 \quad (4.2)$$

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n y_{ijk} M_i}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n M_i^2} \quad (4.3)$$

Hesaplamalar yapılırken çalışma ekibi ve dört yurt içi dört yurt dışı müşterisinin görüşleri de alınarak kalite kayıp katsayıları tel çapı için 0,5; mukavemet için 1,0; kaplama miktarı için 1,5 ve yüzey pürüzlülüğü için 2,0 olarak kabul edilmiştir.

#### 4.4. Kalite Kayıplarının Normalize Edilmesi

Her bir yanıtın kontrol faktörlerinin ayarlarına bağlı olarak hesaplanan kalite kayıp değerleri normalizasyon işlemine tabi tutulur. Farklı ölçüm birimlerine sahip olan birden fazla seçeneğin aynı anda değerlendirilmesini sağlamak için ya tüm alternatifler ikili karşılaştırma işlemine tabi tutulmalı ya da normalizasyon yapılmalı yani birimlerinden arındırılmalıdır. Çok kriterli karar verme tekniklerinde olduğu gibi çok yanıtlı dinamik tasarımlarda da uygulama kolaylığı açısından lineer normalizasyon işlemi uygulanmıştır. Çalışmada her bir kalite kayıp değeri, ilgili yanıt kalite kayıplarının en büyük olanına oranlanarak normalizasyon işlemi yapılmıştır. Normalizasyon formülasyonu (4.4)' te görülmektedir.

$$N_{ij} = \frac{L_{ij}}{L_i^*} \quad (4.4)$$

$N_{ij}$  = i. deneme J. yanıt normalize edilmiş kalite kaybı

$L_i^*$  = i. denemedeki en büyük kalite kayıp değeri

#### 4.5. Toplam Kalite Kaybının Hesaplanması

Her faktör seviyesi için hesaplanan ve normalleştirilen kalite kayıpları tüm kalite karakteristikleri için ortak bir değerlendirme imkânı sağlaması amacıyla toplam kalite kaybına dönüştürülür. Bunun için yanıtların birbirine göre önem sıralaması Analitik Hiyerarşi Prosesine göre belirlenmiştir. Önem sıralaması belirlenirken müşterinin yani Taguchi' ye göre toplumun içindeki kullanıcıların görüşleri belirli kriterlere verdikleri ağırlıklarla değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme kriterleri;

Normalleştirilen kalite kayıpları hesaplandıktan sonra AHP ile bulunan tüm yanıtlara ilişkin ağırlık değerleri ile normalleştirilen kayıp değerleri çarpılarak toplamı alınır. Bu şekilde her bir deney için Toplam Normalleştirilen Kalite

Kayıpları (TNKK) hesaplanmış olur. Aşağıda her faktör kombinasyonu için kullanılacak TNKK formülü görülmektedir.

$$TNKK_j = \sum_{i=1}^m w_i N_{ij} \quad (4.5)$$

$TNKK_j = j.$  denemenin toplam normalleştirilen kalite kaybı

$$w_i = i. \text{ yanıtın ağırlık değeri olup } \sum w_i = 1$$

#### 4.6. Çok Yanıtlı Sinyal Gürültü Oranının Hesaplanması

Performans ölçüsü olarak kullanılan TNKK hesaplandıktan sonra her bir faktör kombinasyonu için performans istatistiği olan Çok Yanıtlı Sinyal Gürültü oranı (ÇYSG) hesaplanır. Her bir faktör seviye kombinasyonu için ÇYSG oranının hesaplanması amacıyla aşağıdaki formül kullanılır.

$$\text{ÇYSG}_j = -10 \log_{10}(TNKK_j) \quad (4.6)$$

#### 4.7. En İyi Faktör Seviye Kombinasyonunun Belirlenmesi

Her bir deneme için elde edilen performans istatistiği ÇYSG oranı değerlerine göre tüm faktörlerin seviye kombinasyonları ayrı ayrı hesaplanmalıdır. ÇYSG oranının en büyüklenmesini sağlayan faktör seviye kombinasyonu sağlam tasarımıyarlaması için gerekli olan veridir. Aşağıdaki Tablo 4.1' de yer alan  $\text{ÇYSG}_j$  değerleri kullanılarak her bir faktörün her bir seviyesine karşılık gelen ÇYSG oranı değerleri hesaplanır. A- hammadde girdi mukavemeti faktörü için 1. ,2. ve 3. Seviye değerlerinin hesaplanması örnek olarak yapılmıştır.

$$A_1 = \frac{0,57987 + 1,98788 + 1,57272 + 1,99895 + 2,32844}{6} = 1,64426$$

$$A_2 = \frac{2,5106 + 3,54352 + 1,97596 + 1,27057 + 2,03814}{6} = 2,21263$$

$$A_3 = \frac{2,02386 + 3,39683 + 1,29038 + 3,24915 + 1,72889}{6} = 2,262278$$

**Tablo 4.1.** Deneyler ve Faktörlere Karşılık Gelen ÇYSG Oranları

| Deney<br>No | FAKTÖRLER |   |   |   |   |   |   |   |   |   | ÇYSG <sub>J</sub> |
|-------------|-----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-------------------|
|             | A         | B | C | D | E | F | G | H | I | J |                   |
| 1           | 1         | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,57987           |
| 2           | 1         | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1,98788           |
| 3           | 1         | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1,3977            |
| 4           | 2         | 1 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2,5106            |
| 5           | 2         | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 3,54352           |
| 6           | 2         | 3 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1,97596           |
| 7           | 3         | 1 | 1 | 3 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2,02386           |
| 8           | 3         | 2 | 2 | 1 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2,39683           |
| 9           | 3         | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2,29038           |
| 10          | 1         | 1 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1,57272           |
| 11          | 1         | 2 | 1 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1,99895           |
| 12          | 1         | 3 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2,32844           |
| 13          | 2         | 1 | 3 | 1 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1,93698           |
| 14          | 2         | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1,27057           |
| 15          | 2         | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2,03814           |
| 16          | 3         | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 3,24915           |
| 17          | 3         | 2 | 3 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1,88754           |
| 18          | 3         | 3 | 1 | 2 | 3 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1,72889           |

Faktörlerin ÇYSG oranı üzerindeki ana etkileri Tablo 4.2’ de görülmektedir.

**Tablo 4.2.** Faktör Seviyelerine Göre ÇYSG Oranı Ana Etkileri

| FAKTÖR ADI                | ÇYSG Oranı Üzerindeki Ana Etkiler |                       |                       |                       |              |
|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|
|                           | FAKTÖR SEVİYELERİ                 |                       |                       |                       |              |
|                           | FAKTÖRLER                         | SEVİYE<br>1           | SEVİYE<br>2           | SEVİYE<br>3           | MAKS-<br>MİN |
| Hammadde Girdi Mukavemeti | A                                 | 1,64426               | 2,21263               | <b><u>2,26278</u></b> | 0,61852      |
| Tav Fırın Sıcaklığı       | B                                 | 1,9788                | <b><u>2,18088</u></b> | 1,95992               | 0,22096      |
| Ergimiş Metal Sıcaklığı   | C                                 | 1,59635               | <b><u>2,41851</u></b> | 2,10538               | 0,50903      |
| Tei Dalma Boyu            | D                                 | 1,85094               | 1,89351               | <b><u>2,37522</u></b> | 0,52428      |
| Flux Ölçüm Sıklığı        | E                                 | <b><u>2,21032</u></b> | 1,91435               | 1,99499               | 0,21533      |
| Verici Türü               | F                                 | <b><u>2,07851</u></b> | 2,00126               |                       | 0,07725      |
| Sarıcı Türü               | G                                 | <b><u>2,04101</u></b> | 2,03917               |                       | 0,0018       |
| Çinko Sıyırma Türü        | H                                 | 1,70718               | <b><u>2,20624</u></b> |                       | 0,49906      |
| Kazan Türü                | I                                 | <b><u>2,14163</u></b> | 1,93815               |                       | 0,20348      |
| Ocak İzolasyonu           | J                                 | 1,86394               | <b><u>2,18068</u></b> |                       | 0,31678      |

Her bir faktör için en yüksek performans istatistiğine (ÇYSG) sahip olan seviye o faktör için en iyi seviye olarak kabul edilir. Bu durumda en iyi faktör/seviye kombinasyonu

$$A_2B_2C_2D_3E_1F_1G_1H_2I_1J_2$$

olarak belirlenir.

#### 4.8. Sıcak Daldırma Galvanizleme Hattında Çok Kriterli Karar Verme Tekniklerinden VİKOR’ un Uygulanması

Dinamik Taguchi Metodu ile elde edilen sonuçların karşılaştırmasının yapılması amacıyla deney sonuçlarının VİKOR metodu ile çözümlenmiş ve elde edilen farklı faktör seviye kombinasyonları doğrulama deneylerinde uygulanmıştır.

Karar verici ekip birinci sırada yer alan seçeneği uygun sıralama olarak kabul etmiştir. Kabul edilen uzlaşık sıralama sonucunda faktör değerleri:

$$A_3B_3C_3D_2E_1F_2G_1H_1I_2J_1$$

Bu durumda VIKOR çok kriterli karar verme tekniğine göre yapılan analiz sonuçları Tablo 4.3’te görülmektedir.

**Tablo 4.3. VIKOR Sıralama Sonuçları**

| Faktör Kodu | Faktörler                                      | Faktör Seviyeleri ve Değerleri |                  |
|-------------|------------------------------------------------|--------------------------------|------------------|
|             |                                                | Faktör Seviyesi                | Faktör Değeri    |
| A           | Hammadde girdi mukavemeti (N/mm <sup>2</sup> ) | 3                              | 1100-1200        |
| B           | Tav fırın sıcaklığı (°C)                       | 3                              | 900              |
| C           | Ergimiş metal sıcaklığı (°C)                   | 3                              | 465              |
| D           | Tel dalma boyu (m)                             | 2                              | 7                |
| E           | Flux ölçüm sıcaklığı                           | 1                              | 1                |
| F           | Verici tipi                                    | 2                              | Çift Pozisyonlu  |
| G           | Sarıcı tipi                                    | 1                              | Rozet Kangal     |
| H           | Çinko sıyırma tipi                             | 1                              | Pad Sıyırma      |
| I           | Kazan tipi                                     | 2                              | Tuğla Kazan      |
| J           | Ocak izolasyonu                                | 1                              | Tek Katlı Koruma |

Taguchi, Vikor ve mevcut üretim şartlarından alınan örnekler ile doğrulama deneyleri yapılmıştır. Tüm sonuçlar belirli kriterlere göre kıyaslanmıştır.

## SONUÇ

Ülkemizde ve diğer ülkelerde Taguchi’ nin statik sistemler için önerdiği metot tek yanıtı ve çok yanıtı optimizasyonlar için oldukça geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bu konuda çok sayıda vaka çalışması yapılmıştır. Ancak 1990 yılında Taguchi’ nin önerdiği dinamik sistem metodolojisi, ülkemizde bilinmemektedir. Oysa yurtdışında dinamik sistemlere giderek artan bir ilgi mevcuttur. Yapılan

alışmalar gerek tek yanıtlı gerekse çok yanıtlı dinamik sistemlerin gördüğü ilginin bir kanıtı durumundadır.

Yapılan literatür incelemelerinden açıkça görüldüğü üzere, sağlam tasarımlar elde etme çabalarını tanımlamak için kullanılan çok sayıda ve hemen hemen aynı anlamı taşıyan kavramlar mevcuttur; Taguchi dinamik sistemleri ya da sinyal-yanıt sistemlerinde olduğu gibi. Bununla birlikte, Taguchi dinamik sistemlerine farklı kullanıcılar tarafından getirilen eleştirilerin yanında bazı temel ilkeler üzerinde ortak görüşler olduğu bilinmektedir. Bu ortak nokta, sistemdeki varyasyonun azaltılması ve gürültü faktörlerinin ortadan kaldırılmasından çok sistemin bu faktörlere duyarsız hale getirilmesi gerekliliğidir.

Özellikle teknoloji geliştirme amacıyla dünyada yaygın bir kullanım alanına sahip olan Taguchi dinamik sistemlerine ülkemiz bilim ve sanayi çevrelerinin dikkatini çekmek amacıyla hazırlanan bu çalışma buz dağının sadece dışarıda kalan kısmının bir bölümüne değinmiştir. Bir sonraki çalışmada Taguchi dinamik sistemlerin daha detaylı açıklaması ve eleştiri getirilen noktalara çözüm nerileri getiren farklı çalışmalar ile mevcut metodun sonuçlarının karşılaştırılması hedeflenmektedir.

Yapılan deneyler neticesinde elde edilen sonuçlar Taguchi ve Vikor metotlarıyla analiz edilmiştir. Elde edilen ideal faktör-seviye ayarlarına göre doğrulama deneyleri gerçekleştirilmiştir.



## KAYNAKLAR

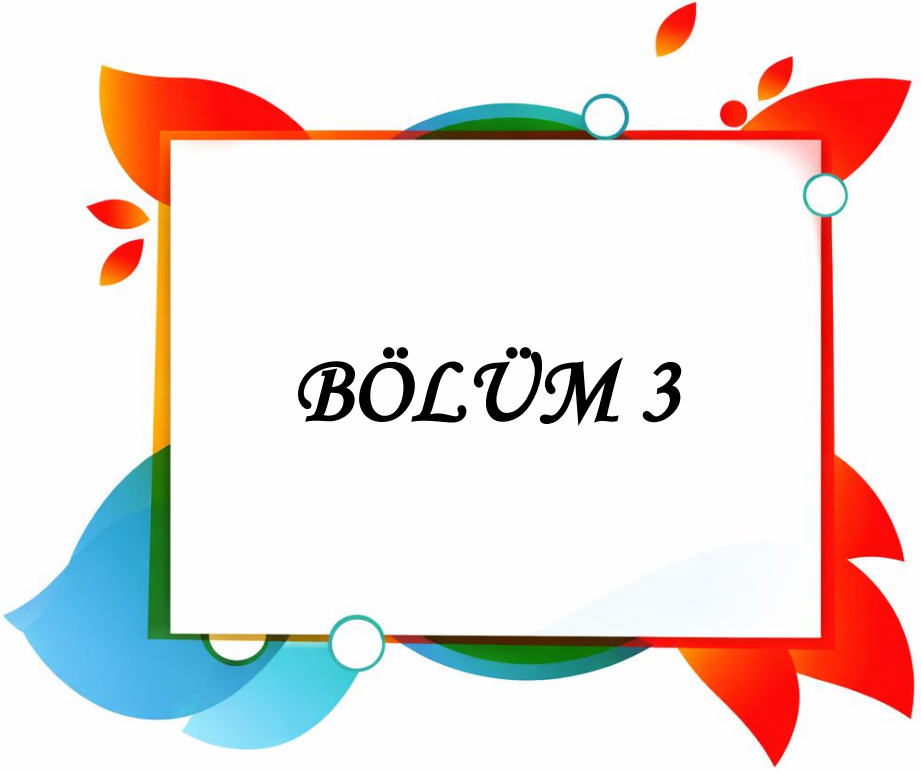
- Akman, E., & Özkan, C. (2011). Sac İmalatında Karşılaşılan Yapışma Probleminin Deney Tasarımı ile Çözümü. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 187-199.
- Amiri A., Bashiri M., & Mogouie H., & Doroudyan M. H. (2012). Non-normal Multi-Response Optimization by Multivariate Process Capability Index. *Scientia Iranica*, 1894-1905.
- Anawa, E. M. & Olabi, A. G. (2008). Using Taguchi Method to Optimize Welding Pool of Dissimilar Laser-Welded Components. *Optics & Laser Technology*, 379-388.
- Arvidsson M., & Gremyr I. (2008). Principles of Robust Design Methodology. *Quality and Reliability Engineering International*, 23-35.
- Bahloul, R., Mkaddem, A., Santo, P. D. & Potiron, A. (2006). Sheet Metal Bending Optimisation Using Response Surface Method: Numerical Simulation and Design of Experiments. *International Journal of Mechanical Sciences*, 4991-1003.
- Baynal, K. (2003). Çok Yanıtlı Problemlerin Taguchi ile Eniyilenmesi ve Bir Uygulama. *Doktora Tezi*. İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi, İstanbul.
- Boylan G. L., & Cho B. R. (2013). Solving the Multidisciplinary Robust Parameter Design Problem for Mixed Type Quality Characteristics under Asymmetric Conditions. *Quality and Reliability Engineering International*.
- Boylan, G. L., Goethals, P. L., & Rae Cho, B. (2013). Robust parameter design in resource-constrained environments: An investigation of trade-offs between costs and precision within variable processes. *Applied Mathematical Modelling*, 2394-2416.
- Bryne, D. M. & Taguchi, S. (1986). The Taguchi Approach to Parameter Design, *ASQC Quality Congress Transactions*, Anaheim.
- Chang H. H. (2008). A data mining approach to dynamic multiple responses in Taguchi experimental design. *Expert Systems with Applications*, 1095-1103.
- Chen, Y. C., Lin, Y. C., & Wang, H. T. (2013). Optimization of Injection Molding Process Parameters Using the Taguchi Method and Grey Relational Analysis. *Journal of Cleaner Production*, 1-10.
- Cheng, W. T., Li, H. C. & Huang, C. N. (2008). Simulation and Optimization of Silicon Thermal CVD Through CFD Integrating Taguchi Method. *Chemical Engineering Journal*, 603-613.
- Çelik, C. & Burnak, N., (1998). A Systematic Approach to the Solution of the Design Optimization Problem. *Total Quality Management*, 101.
- Dasgupta T., Miller A. & Wu C. F. J. (2010). Robust Design of Measurement Systems. *Technometrics*, 338-346.

- Dehnad K., (1989). *Quality Control, Robust Design and the Taguchi Method*. California: Wadsworth&Brooks/Cole, Statistics/Probability Series.
- Dixon, D., Eatock, J., Meenan, B. J. & Morgan, M. (2006). Application of Design of Experiment (DOE) Techniques to Process Validation in Medical Device Manufacture. *Journal of Validation Technology*, 92-100.
- Gupta S., Kulahci M., Montgomery D. C., & Borror C. M. (2009). Analysis of signal-response systems using generalized linear mixed models. *Quality and Reliability Engineering International*, 375-385.
- Hamzaçebi, C. & Kutay, F. (2003). Taguchi Metodu: Bir Uygulama. *Teknoloji*, 3-4.
- Huang Y., Harte S., Sad L., & King J. (1998). Dynamic Parameter Optimization of an Automobile A/C Compresso Using Taguchi Method. *International Compressor Engineering Conference*.
- Hsieh K. L., Tong L., Chiu H., & Yeh H. (2005). Optimization of a Multi-Response Problem in Taguchi's Dynamic System. *Computers & Industrial Engineering*, 49.
- Jalili, M., Bashiri, M., & Amiri, A. H. (2012). A new multivariate process capability index under both unilateral and bilateral quality characteristics. *Quality and Reliability Engineering International*, 925-941.
- Kackar, R. N. & Shoemaker, A. C. (1986). Robust design: a costeffective method for improving manufacturing processes. *AT&T Technical Journal*, 39-50.
- Kackar, R. N. (1985). Off-Line Quality Control, Parameter Design and the Taguchi Method. *American Society for Quality Control*.
- Khattree, R. (1996). Robust Parameter Design: A Response Surface Approach. *Journal of Quality Technology*, 187-198.
- Kumar, S., Satsangi P.S. & Prajapati D.R. (2011). Optimization of green sand casting process parameters of a foundry by using Taguchi's method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, DOI:10.1007/s00170-010-3029-0.
- Lesperance M. L., & Park S. M. (2003). GLMs for the analysis of robust design with dynamic characteristics. *Journal of Quality Technology*, 253-263.
- Lunani, M., Nair, V. N. & Wasserman, G. S. (1997). Graphical Methods for Robust Design with Dynamic Characteristics. *Journal Of Quality Technology*, 327-338.
- Miller, A., & Wu C. F. J. (1996). Commentary on Taguchi's parameter design with dynamic characteristics. *Quality and Reliability Engineering International*, 75-78.
- Montgomery, D.C. (2005). *Introduction to Statistical Quality Control, 5th Edition*, John Wiley & Sons.

- Oudjene, M. & Ben-Ayed, L. (2008). On the Parametrical Study of Clinch Joining of Metallic Sheets Using the Taguchi Method. *Engineering Structures*, 1782-1788.
- Pal, S., & Gauri, S. K. (2010). Multi-Response Optimization Using Multiple Regression-Based Weighted Signal-to-Noise Ratio (MRWSN). *Quality Engineering*, 336-350.
- Park, S. H. (1996). *Robust design and analysis for quality engineering*. New York: Chapman & Hall.
- Phadke, M. S. (1989). *Quality Engineering Using Robust Design*. New Jersey: Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Pignatiello, J. J. (1988). An Overview of the Strategy and Tactics of Taguchi. *IIE Transactions*, 247.
- Rojas, C. R., Welsh, J. S., Goodwin, G. C. & Feuer, A. (2006). Robust Experiment Design for System Identification. *Automatica*, 993-1008.
- Rosa, J. L., Robin, A., Silva, M. B., Baldan, C. A. & Peres, M. P. (2008). Electrodeposition of Copper on Titanium Wires: Taguchi Experimental Design Approach. *Journal of Materials Processing Technology*, 1181-1188.
- Roshan J., & Wu C. F. J. (2002). Robust parameter design of multiple target systems. *Technometrics*, 338-346.
- Ross, P. J. (1996). *Taguchi Techniques For Quality Engineering*. New York: Mc Graw Hill.
- Roy, R. K. (2010). *A Primer on the Taguchi Method*. Society of Manufacturing Engineers. ISBN-13: 978-0872634688
- Shoemaker A. C., Tsui K. L. & Wu C. F. J., (1991). Economical experimentation method for robust design. *Technometrics*: 415-427.
- Taguchi, G. & Wu, Y. (1979). *Introduction To Off-Line Quality Control*. Central Japan Quality Control Association: Nagaya.
- Taguchi G. (1986). *Introduction to Quality Engineering—Designing Quality into Products and Processes*. Asian Productivity Organization: Tokyo.
- Taguchi, G. (1991). *System of Experimental Design*. ASI: Dearborn.
- Taguchi, G. (1993(a)). *Taguchi Methods: Research and Development*. American Suppliers Institute Press: Dearborn.
- Taguchi, G. (1993(b)). *Taguchi on Robust Technology Development*. <http://ebooks.asmedigitalcollection.asme.org>, Erişim Tarihi: 01.05.2016.
- Taguchi, G., Jugulum, R. & Taguchi, S. (2004). *Computer-Based Robust Engineering*. ASQ Quality Press: Milwaukee, Wisconsin.

- Taphasanoğlu, S. (2020). Çok Yanıtlı Problemlere Sürekli-Sürekli Kalite Karakteristikleri için Dinamik Taguchi Yöntemi Yaklaşımı. *Doktora Tezi*. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 628688.
- Tong, L. I., Su, C. T. & Wang, C. H. (1997). The optimization of multi-response problems in the Taguchi method. *International Journal of Quality & Reliability Management*: 367-380.
- Truong, N. K. V., Shin, S. & Jeong, S. H. (2011). Robust design modelling and optimisation using response surface methodology and inverse problem. *International Journal of Experimental Design and Process Optimisation*: 202-220.
- Wasserman, G. S. (1996). Parameter design with dynamic characteristics: a regression perspective. *Quality and Reliability Engineering International*: 113-117.
- Welch, W. J. ,Yu T. K. , Kang S. M. & Sacks J. (1990). Computer experiments for quality control by parameter design. *Journal of Quality Technology*: 15-22.
- Wu, C. F. J. & Hamada, M. (2001). *Experiments: Planning, analysis, and parameter design optimization*: John Wiley & Sons Inc.
- Wu D., Chien W. & Tsai Y. (2005). Applying Taguchi Dynamic Characteristics to the Robust Design of a Piezoelectric Sensor. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*: 52-3.
- Wu Y. & Wu A. (2000). *Taguchi Methods for Robust Design*. The American Society of Mechanical Engineers: New York.
- Yadav, O. P., Bhamare, S. S. & Rathore, A. (2010). Reliability-based robust design optimization: A multi-objective framework using hybrid quality loss function. *Quality and Reliability Engineering International*: 27-41.
- Yano, H. (1991). *Metrological Control: Industrial Measurement Management*. Asian Productivity Organization: Tokyo.
- Yung-Tien L., Rong-Fong F. & Chun-Chao W. (2007). Application of the Nonlinear, Double-Dynamic Taguchi Method to the Precision Positioning Device Using Combined Piezo-VCM Actuator. DOI: 10.1109/tuffc.2007.239.
- Zhiyu, Z., Zhen, H. E. & Xiangfen, K. (2006). A new desirability function based method for multi-response robust parameter design. *International Technology and Innovation Conference*. 178-183. <https://doi.org/10.1049/cp:20060751>





## *BÖLÜM 3*

# Laboratuvar Ortamında Et Üretimi: Kültürlenmiş Etin Biyoteknolojik Temelleri, Üretim Süreci ve Gelecek Perspektifleri

*Gencehan Karadağoglu<sup>1</sup>*

## 1. Giriş

Kültürlenmiş et, hayvanlardan elde edilen uygun hücrelerin kontrollü laboratuvar koşullarında çoğaltılması, farklılaştırılması ve kas dokusu benzeri yapılar halinde organize edilmesiyle üretilen yeni nesil bir et üretim teknolojisidir. Bu yaklaşım, geleneksel hayvancılık sistemlerinden farklı olarak canlı hayvanın büyütülmesi ve kesilmesi yerine, etin temel biyolojik yapı taşları olan kas, yağ ve bağ doku hücrelerinin hücre kültürü ortamında çoğaltılmasına dayanmaktadır. Bununla birlikte kültürlenmiş et üretimi sadece alternatif protein üretimi olarak değil, hücre biyolojisi, doku mühendisliği, biyoproses mühendisliği ve gıda teknolojisinin kesişiminde yer alan çok disiplinli bir hücresel üretim modeli olarak ta değerlendirilmelidir.

Bu teknolojinin temel çıkış noktası, artan dünya nüfusu, protein talebindeki yükseliş, çevresel sürdürülebilirlik kaygıları, hayvan refahı tartışmaları ve gıda güvenliği arayışlarıdır. Geleneksel et üretimi yüksek arazi, su, yem ve enerji kullanımıyla ilişkilendirilmekte; ayrıca sera gazı emisyonları, zoonotik hastalık riski ve antibiyotik kullanımı gibi konular nedeniyle giderek daha fazla sorgulanmaktadır. Kültürlenmiş et bu sorunlara doğrudan ve tek başına kesin bir çözüm sunmasa da, et üretiminin biyolojik ve endüstriyel mantığını yeniden tasarlayan güçlü bir alternatif üretim yaklaşımı olarak öne çıkmaktadır.

Kültürlenmiş et üretiminde temel süreç, uygun hücre kaynağının seçilmesiyle başlamaktadır. Genellikle kas uydu hücreleri, miyoblastlar, mezenkimal kök hücreler (MSC) veya indüklenmiş pluripotent kök hücreler gibi çoğalma ve farklılaşma kapasitesine sahip hücreler kullanılmaktadır. Bu hücreler, besin maddeleri, aminoasitler, vitaminler, mineraller, enerji kaynakları ve büyüme faktörleri içeren kültür ortamlarında çoğaltılmakta; daha sonra kas, yağ veya bağ doku benzeri hücresel yapılara farklılaştırılmaktadır. Ancak laboratuvar ortamında hücre çoğaltmak ile et benzeri bir gıda ürünü oluşturmak aynı şey değildir. Gerçek et dokusu tek başına kas proteinlerinden oluşmaz; yağ dağılımı, bağ doku

---

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Kafkas Üniversitesi, Kars Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, Kars-Türkiye, ORCID: 0000-0003-3610-5894

organizasyonu, aroma, tekstür ve su tutma özellikleri de ürün kalitesini belirlemektedir (Fraeye ve ark.,2020; Ben-Arye ve Levenberg, 2019).

Böylece kültürlenmiş et üretiminin en kritik boyutlarından biri, sadece hücrelerin çoğaltılması değil, üç boyutlu doku benzeri yapılara dönüştürülmesidir. Bu aşamada biyoreaktör sistemleri, taşıyıcı materyaller, iskele yapılar, mekanik veya elektriksel uyarımlar ve kültür ortamı kompozisyonu belirleyici rol oynamaktadır. Hücrelerin yeterli yoğunlukta çoğalması, oksijen ve besin maddelerine erişmesi, metabolik atıkların ortamdan uzaklaştırılması ve ürünün gıda olarak güvenli şekilde elde edilmesi, sürecin teknik başarısını belirleyen temel parametrelerdir. (Humbird, 2021; Allan ve ark.,2019)

Günümüzde kültürlenmiş et teknolojisi bilimsel olarak mümkün hale gelmiş olsa da, geniş ölçekli üretim, maliyet, kültür ortamı optimizasyonu, serum kullanımının azaltılması, biyoreaktör tasarımı, ürün tekstürü, regülasyon ve tüketici kabulü gibi önemli sorunlar devam etmektedir. Amerika Birleşik Devletleri’nde FDA; 2022’de UPSIDE Foods’un kültürlenmiş tavuk ürünü için ilk ön-pazar güvenlik değerlendirmesini tamamlamış ve firmanın sunduğu güvenlik sonuçlarına ilişkin herhangi bir endişesi olmadığını bildirmiştir; EFSA ise Avrupa Birliği’nde hücre kültürü kaynaklı hayvansal gıda başvurularını “yeni gıda” çerçevesinde değerlendirmektedir. Bu gelişmeler, kültürlenmiş etin yalnızca laboratuvar ölçekli bir teknoloji olmaktan çıkıp regülasyon, üretim ve tüketici boyutlarıyla gıda sistemine dahil olmaya başladığını göstermektedir (FDA, 2022).

Bu bölümde kültürlenmiş et üretimi, hücre kaynağı seçiminden kültür ortamı tasarımına, biyoreaktör sistemlerinden doku mühendisliğine, ürün kalitesinden regülasyon ve sürdürülebilirlik tartışmalarına kadar bütüncül bir çerçevede ele alınacaktır. Amaç, kültürlenmiş eti yalnızca “laboratuvarda üretilen et” olarak tanımlamak değil; bu üretim modelinin biyolojik, teknolojik ve endüstriyel dinamiklerini mekanizma temelli biçimde açıklamaktır.

## **2. Kültürlenmiş Et Kavramı ve Hücresel Tarım İçindeki Yeri**

Kültürlenmiş et, hayvansal hücrelerin kontrollü hücre kültürü koşullarında çoğaltılması ve organize edilmesiyle elde edilen biyolojik bir et üretim sistemi olarak tanımlanmaktadır. Literatürde bu teknoloji için “cultured meat”, “cultivated meat”, “cell-based meat”, “cell-cultured meat” ve “in vitro meat” gibi farklı terminolojiler kullanılmaktadır. Ancak son yıllarda özellikle regülasyon kurumları ve endüstri tarafından “cultivated meat” terimi daha yaygın biçimde tercih edilmeye başlanmıştır. Bunun temel nedeni, “in vitro meat” ifadesinin laboratuvar ölçeğini çağrıştırması ve tüketici algısı açısından olumsuz değerlendirilmesidir (Post, 2012; Stephens ve ark.,2018).



Kültürlenmiş et teknolojisi, daha geniş bir üretim modeli olan hücresel tarım (cellular agriculture) kavramının bir alt bileşeni olarak değerlendirilmektedir. Hücresel tarım, hayvansal kaynaklı ürünlerin tamamının veya belirli bileşenlerinin doğrudan hayvan yetiştirilmeden, hücre kültürü veya biyosentetik üretim sistemleri aracılığıyla elde edilmesini ifade etmektedir. Bu kapsamda yalnızca et değil; süt proteinleri, yumurta proteinleri, jelatin, kollajen ve bazı biyolojik aktif bileşikler de hücresel tarım yaklaşımıyla üretilmektedir (Mattick ve ark.,2015; Fraeye ve ark.,2020).

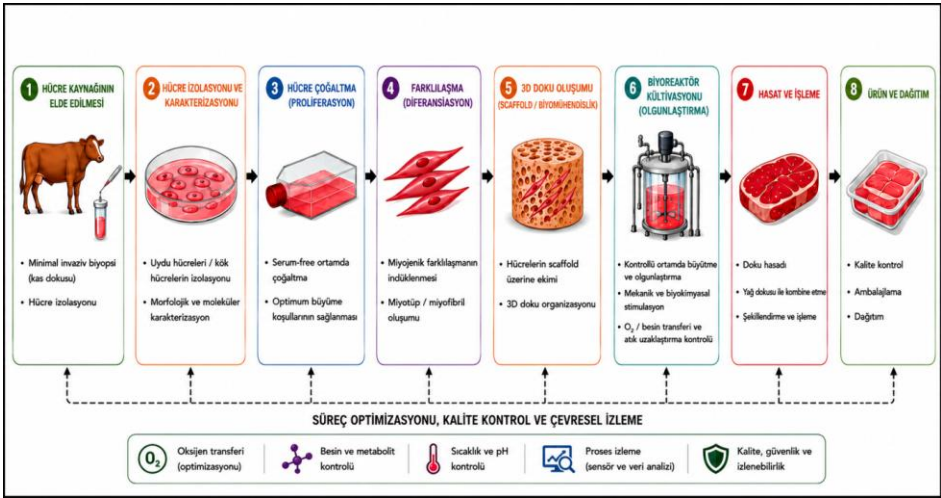
Bu üretim yaklaşımı, geleneksel hayvancılığın biyolojik mantığını tamamen değiştirmektedir. Geleneksel sistemlerde kas dokusunun oluşabilmesi için hayvanın tüm organizmasının büyütülmesi gerekirken, kültürlenmiş et modelinde ise hedef dokuya ait hücreler çoğaltılmaktadır. Bu durum, teorik olarak kaynak kullanımının optimize edilmesine, üretim süresinin azaltılmasına ve üretim süreçlerinin daha kontrollü hale getirilmesine olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte, biyolojik sistemlerin laboratuvar ortamında yeniden yapılandırılması önemli teknik ve mühendislik problemlerini de beraberinde getirmektedir. Geleneksel et üretimi ile kültürlenmiş et üretim sistemleri arasındaki temel farklılıklar Tablo 1’de özetlenmiştir.

**Tablo 1.** Geleneksel et üretimi ve kültürlenmiş et üretiminin temel karşılaştırılması

| Parametre                    | Geleneksel et üretimi        | Kültürlenmiş et üretimi           |
|------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Üretim modeli</b>         | Hayvan yetiştiriciliği       | Hücre kültürü temelli üretim      |
| <b>Kaynak kullanımı</b>      | Yüksek arazi ve su kullanımı | Teorik olarak daha düşük kullanım |
| <b>Hayvan kesimi</b>         | Gereklidir                   | Minimal biyopsi yeterli olabilir  |
| <b>Kontaminasyon riski</b>   | Zoonotik riskler mevcut      | Kontrollü sistem avantajı         |
| <b>Üretim süresi</b>         | Aylar–yıllar                 | Hücre proliferasyon hızına bağlı  |
| <b>Enerji gereksinimi</b>    | Orta                         | Yüksek biyoreaktör enerjisi       |
| <b>Ürün standardizasyonu</b> | Biyolojik değişkenlik yüksek | Kontrollü üretim potansiyeli      |
| <b>Tüketici algısı</b>       | Geleneksel kabul yüksek      | Güven ve doğallık tartışmalı      |
| <b>Regülasyon durumu</b>     | Yerleşik sistem              | Gelişmekte olan mevzuat           |

Kaynak: Post (2012), Stephens ve ark., (2018) ve Chrikı ve Hocquette (2020) çalışmalarından derlenerek hazırlanmıştır.

Kültürlenmiş et üretiminin bilimsel temeli, doku mühendisliği ve rejeneratif tıp çalışmalarına dayanmaktadır. Özellikle kas dokusunun laboratuvar ortamında yeniden oluşturulmasına yönelik çalışmalar, kültürlenmiş et teknolojisinin gelişiminde kritik rol oynamıştır. İlk dönem araştırmalar daha çok biyomedikal uygulamalara odaklanırken, 2000’li yıllardan itibaren bu yaklaşımların gıda üretimine adapte edilmesi gündeme gelmiştir (Bhat ve Fayaz, 2011; Post, 2012). Kültürlenmiş et üretim sürecinin temel aşamaları Şekil 1’de şematik olarak gösterilmiştir.



**Şekil 1. Kültürlenmiş et üretim süreci** (Post, 2012., Stephens ve ark., 2018., Chriki ve Hocquette, 2020).

Bu alandaki en dikkat çekici gelişmelerden biri, 2013 yılında Mark Post ve çalışma arkadaşları tarafından geliştirilen ilk kültürlenmiş hamburger prototipidir. Yaklaşık 250.000 Euro maliyetle üretilen bu ürün, teknolojinin biyolojik olarak mümkün olduğunu göstermesi açısından önemli bir dönüm noktası olarak kabul edilmektedir (Post, 2014). Ancak bu ilk örnek aynı zamanda, kültürlenmiş et üretiminin ekonomik sürdürülebilirliği, ölçeklendirme kapasitesi ve ürün kalitesi açısından çözülmesi gereken çok sayıda problemi de ortaya koymuştur.

Kültürlenmiş et teknolojisinin ortaya çıkışında etkili olan en önemli faktörlerden biri sürdürülebilirlik tartışmalarıdır. Geleneksel hayvancılık sistemleri; yüksek arazi kullanımı, yoğun su tüketimi, yem ihtiyacı ve sera gazı emisyonları ile ilişkilendirilmektedir. Özellikle geviş getiren hayvanlardan kaynaklanan metan emisyonları, hayvansal üretimin iklim değişikliği üzerindeki etkilerinin merkezinde yer almaktadır (Tuomisto ve Teixeira de Mattos, 2011). Kültürlenmiş etin teorik olarak daha düşük çevresel yük oluşturabileceği öne sürülse de, bu durum kullanılan enerji kaynağı, biyoreaktör sistemi ve üretim ölçeğine bağlı olarak değişebilmektedir. Dolayısıyla kültürlenmiş etin çevresel avantajları konusunda literatürde halen tartışmalar devam etmektedir (Lynch ve Pierrehumbert, 2019).

Hayvan refahı da kültürlenmiş et teknolojisinin öne çıkan motivasyonlarından biridir. Geleneksel et üretiminde büyük ölçekli hayvancılık uygulamalarına yönelik etik tartışmalar, alternatif üretim modellerine ilgiyi artırmıştır. Kültürlenmiş et yaklaşımı teorik olarak çok sınırlı sayıda biyopsi işlemi ile yüksek miktarda et üretimine olanak sağlayabileceğinden, hayvan kesiminin azaltılabileceği ileri sürülmektedir. Ancak başlangıç dönemlerinde fetal bovine serum (FBS) kullanımının yaygın olması, bu teknolojinin etik üstünlüğü konusunda tartışmalara yol açmıştır. Buna karşın günümüzde serum-free veya

hayvansal bileşen içermeyen kültür ortamlarının geliştirilmesi en kritik araştırma alanlarından biri haline gelmiştir (Specht ve ark.,2018; Stout ve ark.,2021).

Kültürlenmiş etin yalnızca biyolojik olarak üretilmesi yeterli değildir; aynı zamanda tüketici tarafından “et” olarak kabul edilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla ürünün tekstürü, aroma profili, yağ dağılımı, renk ve pişirme özellikleri büyük önem taşımaktadır. Gerçek kas dokusu yalnızca miyofibriller proteinlerden oluşmamakta; bağ doku, yağ hücreleri, damar benzeri yapılar ve kompleks hücre dışı matriks bileşenleri de ürün karakterini belirlemektedir. Buna ek olarak kültürlenmiş et üretiminde temel hedef sadece hücre çoğaltmak değil, organize ve fonksiyonel bir doku sistemi oluşturmaktır (Ben-Arye ve Levenberg, 2019).

Teknolojinin endüstriyel uygulanabilirliği açısından en kritik konulardan biri ölçeklendirmedir. Laboratuvar ortamında birkaç gram düzeyinde kas dokusu üretmek biyolojik olarak mümkün olsa da, bunu tonlarca üretim kapasitesine sahip ekonomik bir sisteme dönüştürmek oldukça zordur. Kültürlenmiş et teknolojisinin geleceği sadece hücre biyolojisine değil, aynı zamanda biyoreaktör mühendisliği ve proses optimizasyonuna da bağlıdır. Çünkü oksijen transferi, besin difüzyonu, metabolik atık birikimi ve shear stress gibi biyoproses problemleri özellikle büyük ölçekli üretimin önündeki temel engeller arasında yer almaktadır (Humbird, 2021).

Günümüzde kültürlenmiş et alanı hızla büyüyen bir biyoteknoloji sektörü haline gelmiştir. Amerika Birleşik Devletleri ve Singapur gibi ülkelerde bazı kültürlenmiş et ürünleri için regülasyon süreçleri başlamış, belirli ürünler sınırlı ticari kullanım onayı almıştır. Bununla birlikte Avrupa Birliği’nde kültürlenmiş et ürünleri “novel food” kapsamında değerlendirilmekte olup, güvenlik, besinsel eşdeğerlik ve üretim standardizasyonu gibi konular halen yoğun şekilde tartışılmaktadır (Chriki ve Hocquette, 2020).

Kültürlenmiş et teknolojisi; hücre biyolojisi, doku mühendisliği ve biyoproses teknolojisinin birleştiği çok disiplinli bir üretim yaklaşımıdır. Ancak bu sistemlerin endüstriyel ölçekte uygulanabilir hale gelebilmesi için biyolojik, mühendislik ve ekonomik sorunların birlikte çözülmesi gerekmektedir.

### **3. Hücre Kaynakları ve Hücresel Farklılaşma Mekanizmaları**

Kültürlenmiş et üretiminin temelini, çoğalma ve farklılaşma kapasitesine sahip uygun hücre kaynaklarının seçimi oluşturmaktadır (Post, 2012; Choudhury ve ark.,2020). Üretilecek ürünün yapısı, tekstürü, biyokimyasal özellikleri ve üretim verimliliği büyük ölçüde kullanılan hücre tipine bağlı olarak değişmektedir. Kas dokusunun temel hücresel kaynağı, iskelet kası içerisinde bulunan kas uydu hücreleridir (satellite cells). Bu hücreler ilk kez Mauro (1961) tarafından tanımlanmış olup, kas liflerinin bazal membranı ile sarkolemma arasında lokalize olmuş yetişkin kök hücreler olarak bilinmektedir. Normal

fizyolojik koşullarda büyük ölçüde sessiz (quiescent) halde bulunan bu hücreler, kas hasarı veya büyüme sinyalleri ile aktive olmakta; proliferasyon sonrası miyoblastlara dönüşmekte ve daha sonra birleşerek çok çekirdekli miyotüpleri oluşturmaktadır (Yin ve ark.,2013).

Kültürlenmiş et üretiminde uydu hücrelerinin tercih edilmesinin temel nedeni, doğal olarak kas oluşumuna yönelmiş olmaları ve yüksek miyojenik kapasite göstermeleridir. Bununla birlikte bu hücrelerin proliferasyon kapasitesi sınırsız değildir. Hücrelerin belirli pasaj sayısından sonra yaşlanma (senescence) göstermesi, büyük ölçekli üretim açısından önemli bir sınırlamadır (Bhat ve ark.,2019). Uydu hücrelerine ek olarak mezenkimal kök hücreler (MSC), embriyonik kök hücreler (ESC) ve indüklenmiş pluripotent kök hücreler (iPSC) de kültürlenmiş et üretiminde değerlendirilmektedir. Mezenkimal kök hücreler, kas ve yağ hücrelerine farklılaşabilme potansiyelleri nedeniyle özellikle hibrit doku oluşumunda önem taşımaktadır. Yağ hücrelerinin kültürlenmiş et sistemine dahil edilmesi, ürünün aroma, sululuk ve ağızda bıraktığı his gibi duyuşal özelliklerini doğrudan etkilemektedir (Stout ve ark.,2020).

Embriyonik kök hücreler ve iPSC sistemleri teorik olarak sınırsız proliferasyon kapasitesi sunmaları nedeniyle dikkat çekmektedir. Özellikle iPSC teknolojisi, somatik hücrelerin yeniden programlanarak pluripotent hale getirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu yaklaşım, biyopsi ihtiyacını azaltma ve yüksek proliferasyon kapasitesi sağlama açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak pluripotent hücrelerin kontrollü farklılaştırılması, genetik stabilitelerinin korunması ve tümör benzeri kontrolsüz büyüme risklerinin önlenmesi halen önemli teknik zorluklar arasında yer almaktadır (Takahashi ve Yamanaka, 2006; Kadim ve ark.,2015).

Hücre kaynağının seçimi yalnızca biyolojik kapasite açısından değil, etik, ekonomik ve regülasyonel boyutlar açısından da önem taşımaktadır. Primer hücreler doğal biyolojik özelliklerini daha iyi korurken, sınırlı proliferasyon kapasitesine sahiptir. Sürekli hücre hatları ise daha uzun süreli üretim avantajı sunmakla birlikte genetik değişim riski taşımaktadır. Bu nedenle kültürlenmiş et sistemlerinde hücresel stabilite, genetik güvenlik ve üretim standardizasyonu birlikte değerlendirilmelidir. Kültürlenmiş et üretiminde kullanılan başlıca hücre tipleri ve biyolojik özellikleri Tablo 2’de özetlenmiştir.

**Tablo 2.** Kültürlenmiş et üretiminde kullanılan başlıca hücre tipleri, biyolojik özellikleri ve üretim açısından avantaj/sınırlamaları

| Hücre tipi                                         | Temel özellik                                 | Avantajları                                  | Sınırlamaları                                      | Kullanım amacı               |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------|
| <b>Kas uydu hücreleri (Satellite cells)</b>        | İskelet kasında bulunan yetişkin kök hücreler | Yüksek miyojenik kapasite, doğal kas oluşumu | Sınırlı proliferasyon kapasitesi, senescence riski | Kas dokusu üretimi           |
| <b>Miyoblastlar</b>                                | Kas öncül hücreleri                           | Hızlı proliferasyon ve farklılaşma           | Uzun süreli kültürde stabilite kaybı               | Miyotüp oluşumu              |
| <b>Mezenkimal kök hücreler (MSC)</b>               | Multipotent kök hücreler                      | Kas ve yağ hücrelerine farklılaşabilme       | Farklılaşma kontrolü zor olabilir                  | Hibrit doku üretimi          |
| <b>Embriyonik kök hücreler (ESC)</b>               | Pluripotent hücreler                          | Yüksek proliferasyon kapasitesi              | Etik tartışmalar, regülasyon sorunları             | Deneyisel sistemler          |
| <b>İndüklenmiş pluripotent kök hücreler (iPSC)</b> | Yeniden programlanmış somatik hücreler        | Teorik olarak sınırsız çoğalma               | Genetik stabilite ve tümör riski                   | Uzun dönem üretim sistemleri |
| <b>Adiposit öncül hücreleri</b>                    | Yağ hücresi öncüleri                          | Aroma ve tekstür gelişimi                    | Kültür optimizasyonu gerektirir                    | Yağ dokusu oluşturma         |

Kaynak: Post (2012), Ben-Arye ve Levenberg (2019), Kadim ve ark., (2015), Yin ve ark., (2013) ve Shaikh ve ark., (2021) çalışmalarından derlenerek hazırlanmıştır.

Kültürlenmiş et üretiminde hücrel farklılaşma süreci, proliferasyon kadar kritik bir aşamadır. Kas hücrelerinin yalnızca çoğalması yeterli değildir; aynı zamanda organize kas liflerine dönüşmeleri gerekmektedir. Bu süreçte MyoD, Myf5, myogenin ve MRF4 gibi miyojenik düzenleyici faktörler belirleyici rol oynamaktadır (Bentzinger ve ark.,2012). Özellikle MyoD aktivasyonu, miyoblast farklılaşmasının başlatılmasında merkezi bir mekanizma olarak kabul edilmektedir.

Farklılaşma sürecinde hücrelerin biyokimyasal çevresi büyük önem taşımaktadır. Kültür ortamındaki büyüme faktörleri, aminoasit kompozisyonu, enerji kaynakları ve hücre yoğunluğu farklılaşma verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Ayrıca mekanik gerilim, substrat sertliği ve elektriksel uyarılar gibi fiziksel faktörler de kas liflerinin hizalanmasını ve olgunlaşmasını desteklemektedir (Boehler ve ark.,2019).

Kas dokusunun yanı sıra yağ hücrelerinin üretimi de ürün kalitesi açısından kritik öneme sahiptir. Geleneksel ette intramüsküler yağ dağılımı, aroma oluşumu ve tekstür üzerinde belirleyici rol oynar. PPAR $\gamma$  ve C/EBP $\alpha$  gibi transkripsiyon faktörleri, yağ hücre farklılaşmasının temel düzenleyicileri arasında yer almaktadır (Rosen ve MacDougald, 2006).

Kültürlenmiş et üretiminde hücre–hücre etkileşimleri ve hücre-mikro çevre etkileşimleri de önemli bir konudur. Doğal kas dokusu yalnızca kas hücrelerinden oluşmamakta; fibroblastlar, bağ doku elemanları, damar yapıları ve ekstraselüler yapı bileşenleri de doku organizasyonuna katkı sağlamaktadır. Bu nedenle tek tip hücre kültürleri ile gerçek et dokusunun tam olarak taklit edilmesi oldukça zordur. Günümüzde çok hücreli ko-kültür sistemleri ve üç boyutlu doku mühendisliği yaklaşımları bu problemi çözmeye yönelik geliştirilmektedir (Ben-Arye ve ark.,2020).

Kültürlenmiş et üretim verimliliğini etkileyen bir faktörde hücre metabolizmadır. Hızlı proliferasyon gösteren hücreler yüksek enerji ve aminoasit gereksinimine sahiptir. Bunun sonucunda laktat ve amonyak gibi metabolik yan ürünler ortamda birikebilmekte ve hücre büyümesini baskılayabilmektedir (Humbird, 2021).

#### **4. Kültür Ortamı, Büyüme Faktörleri ve Serum-Free Yaklaşımlar**

Kültürlenmiş et üretiminde hücrelerin canlılığının korunması, çoğaltılması ve kontrollü şekilde farklılaştırılması, büyük ölçüde kullanılan kültür ortamının kompozisyonuna bağlıdır. Kültür ortamı hem hücrelerin büyümesi için gerekli besin maddelerini sağlayan bir sıvı sistem hem de hücre metabolizmayı, gen ekspresyonunu, proliferasyon hızını ve farklılaşma kapasitesini yönlendiren dinamik bir biyolojik mikro çevredir. Bu yüzden kültür ortamı tasarımı, kültürlenmiş et teknolojisinin en kritik ve en maliyetli bileşenlerinden biri olarak görülmektedir (Specht ve ark.,2018).

Klasik hücre kültürü ortamları genellikle aminoasitler, karbonhidratlar, vitaminler, mineraller, tampon sistemleri ve büyüme faktörlerinden oluşmaktadır. Hücrelerin temel enerji kaynağı çoğunlukla glukoz olmakla birlikte glutamin gibi aminoasitler de enerji metabolizmasında yer almaktadır. Bunun yanı sıra esansiyel aminoasitler protein sentezi için gerekli yapı taşlarını sağlamaktadır. Ancak kültürlenmiş et sistemlerinde kullanılan hücrelerin metabolik ihtiyaçları oldukça yüksektir ve bu nedenle ortam kompozisyonunun hassas biçimde optimize edilmesi gerekmektedir (Specht ve ark.,2018).

Kültür ortamlarında proliferasyonu destekleyen en önemli bileşenlerden biri büyüme faktörleridir. Özellikle fibroblast growth factor (FGF), insulin-like growth factor (IGF), transforming growth factor- $\beta$  (TGF- $\beta$ ) ve epidermal growth factor (EGF) gibi moleküller, hücre çoğalması ve farklılaşma süreçlerinde merkezi rol oynamaktadır. FGF-2, özellikle kas uydu hücrelerinin proliferasyonunu destekleyen en kritik faktörlerden biri olarak kabul edilmektedir. Ancak büyüme faktörlerinin maliyetinin yüksek oluşu, kültürlenmiş et üretiminin ekonomik ölçeklenebilirliğinin önünde engel teşkil etmektedir (Post ve ark.,2020).

Kültürlenmiş et teknolojisinin gelişim sürecinde en tartışmalı konulardan biri fetal bovine serum (FBS) kullanımı olmuştur. FBS; büyüme faktörleri, hormonlar, taşıyıcı proteinler ve çeşitli biyolojik aktif bileşikler içeren kompleks bir serum kaynağıdır ve uzun yıllardır hücre kültürü çalışmalarında standart bileşen olarak kullanılmaktadır. Ancak FBS kullanımı hem etik hem ekonomik hem de biyolojik standardizasyon açısından ciddi problemlere sahiptir. Serumun hayvansal kaynaklı olması, kültürlenmiş etin “hayvansız üretim” yaklaşımıyla çeliştiği yönünde eleştirilere neden olmuştur. Ayrıca serum kompozisyonunun partiler arasında değişkenlik göstermesi, üretim standardizasyonunu zorlaştırmaktadır (Van der Valk ve ark.,2018).

Literatüre göre günümüzde kültürlenmiş et araştırmalarının en önemli hedeflerinden biri serum-free veya animal-component-free kültür ortamlarının geliştirilmesidir. Serum-free sistemlerde rekombinant büyüme faktörleri, bitkisel hidrolizatlar, sentetik taşıyıcı proteinler ve tanımlanmış besin bileşenleri kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, daha kontrollü ve tekrarlanabilir üretim süreçlerine olanak tanımaktadır. Bununla birlikte serumun doğal olarak sağladığı kompleks biyolojik destek sisteminin taklit edilmesi konusu aşılması gereken teknik bir zorluk olarak güncelliğini korumaktadır (Kolkman ve ark.,2020).

Kültür ortamının optimizasyonunda metabolik yan ürünlerin kontrol altında tutulması gerekmektedir. Hücre proliferasyonu sırasında oluşan laktat ve amonyak gibi metabolitler ortamda birikerek hücre büyümesini baskılamaktadır. Özellikle yüksek hücre yoğunluğuna sahip biyoreaktör sistemlerinde bu durum daha da belirgin hale gelmektedir (Humbird, 2021).

Oksijen transferi, kültür ortamı tasarımında belirleyici ana faktörlerden biridir. Kas hücreleri yüksek metabolik aktivite gösterdiğinden yeterli oksijen sağlanamaması durumunda hücresel stres ve proliferasyon kaybı görülmektedir. Ancak aşırı oksijenlenme halinde ise reaktif oksijen türlerinin (ROS) artışına bağlı olarak hücresel hasarın oluşmasına neden olmaktadır (Bhat ve ark.,2019).

Kültür ortamının fiziksel özellikleri hücresel davranışları etkilemektedir. Ortamın osmolalitesi, viskozitesi, iyonik dengesi ve pH değeri, hücrelerin proliferasyon ve farklılaşma kapasitesini doğrudan belirlemektedir. Özellikle pH kontrolü büyük önem taşımaktadır çünkü proliferasyon sırasında oluşan metabolik asitler ortamın asitleşmesine yol açmaktadır. Bunu önlemek için bikarbonat tampon sistemleri ve kontrollü CO<sub>2</sub> atmosferleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Kolkman ve ark.,2020; Humbird, 2021).

Kültürlenmiş et üretiminde maliyetin büyük kısmını kültür ortamı oluşturmaktadır. Bazı analizlere göre toplam üretim maliyetinin %50–80’i ortam bileşenlerinden kaynaklanmaktadır (Specht, 2019). Özellikle rekombinant büyüme faktörleri ve serum yerine kullanılan biyolojik aktif moleküller yüksek maliyetlidir. Dolayısıyla düşük maliyetli rekombinant üretim sistemleri, bitki

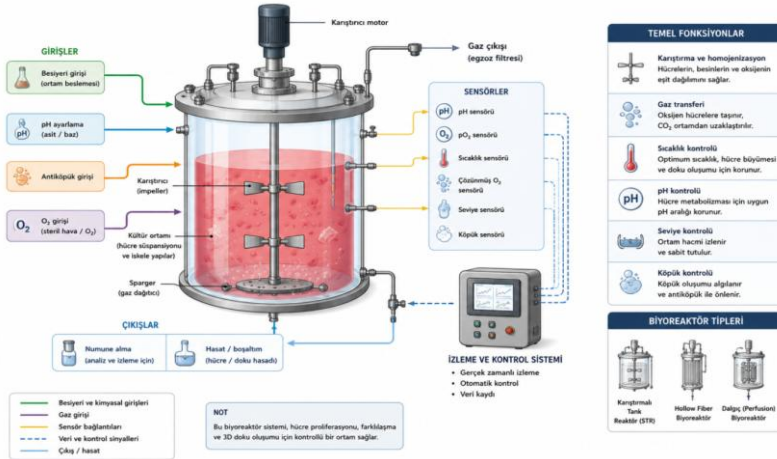
bazlı büyüme faktörleri ve sentetik biyoloji temelli yaklaşımlar giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

Son yıllarda gıda sınıfı (food-grade) kültür ortamı geliştirme çalışmaları da hız kazanmıştır. Geleneksel hücre kültürü ortamları çoğunlukla biyomedikal uygulamalar için tasarlanmış olup, gıda üretimi açısından uygun değildir. Kültürlenmiş et sistemlerini sadece hücre biyolojisi açısından değil, gıda güvenliği ve regülasyon açısından da değerlendirmek gerekmektedir (Ong ve ark.,2021). Bunun yanı sıra kültür ortamlarının sürdürülebilirliği de önemli bir tartışma konusudur. Özellikle büyük ölçekli üretimlerde yüksek miktarda saf aminoasit, büyüme faktörü gereksinimi ve yüksek enerji kullanımı kültürlenmiş etin çevresel avantajlarını sınırlayabilmektedir.

Kültür ortamı tasarımı ve serum-free sistemlerin geliştirilmesi, kültürlenmiş et üretiminde biyolojik verimlilik, maliyet kontrolü ve endüstriyel ölçeklenebilirlik açısından belirleyici araştırma alanları arasında yer almaktadır.

## 5. Biyoreaktör Sistemleri ve Ölçeklendirme Zorlukları

Kültürlenmiş et teknolojisinin laboratuvar ölçeğinden endüstriyel üretime geçişindeki en kritik aşama, hücrelerin büyük hacimlerde kontrollü şekilde çoğaltılmasını sağlayan biyoreaktör sistemleridir. Hücre kültürü düzeyinde birkaç milyon hücre üretmek biyolojik olarak nispeten kolay olmakla birlikte, tonlarca üretim kapasitesine ulaşabilecek yoğun hücresel biyokütle oluşturmak son derece karmaşık bir biyoproses problemidir. Kültürlenmiş et üretiminde kullanılan biyoreaktör sistemlerinin genel yapısı Şekil 2’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. Kültürlenmiş et üretiminde kullanılan tipik bir biyoreaktör sistemi (Humbird., 2021; Kolkman ve ark.,2020; Allan ve ark.,2019).



Biyoreaktörler; sıcaklık, pH, çözülmüş oksijen, besin transferi ve metabolik atık uzaklaştırılması gibi parametrelerin kontrollü şekilde düzenlendiği sistemlerdir. Geleneksel biyoteknolojik üretimlerde mikroorganizmalar süspansiyon halinde çoğaltılırken, hayvansal hücreler hassas ve çevresel değişimlere karşı daha duyarlı yapıdadır. Özellikle kas hücreleri, mekanik strese karşı oldukça hassas olduklarından dolayı biyoreaktör tasarımı hücre canlılığı doğrudan etkilemektedir (Stephens ve ark.,2018).

Kültürlenmiş et üretiminde kullanılan biyoreaktör sistemleri temel olarak adherent (yüzeye tutunarak büyüyen) ve suspension (süspansiyon) sistemler olmak üzere iki ana grupta değerlendirilmektedir. Kas uydur hücreleri ve miyoblastlar doğal olarak adherent hücrelerdir ve proliferasyon için yüzeye ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle hücrelerin büyük ölçekli üretimi sırasında mikro taşıyıcılar (microcarriers) yaygın olarak kullanılmaktadır. Mikro taşıyıcılar, hücrelerin tutunabileceği geniş yüzey alanı sağlayarak biyoreaktör hacmi içerisinde yüksek hücre yoğunluklarına ulaşılmasına olanak tanımaktadır (Bodiou ve ark.,2020). Biyoreaktör sistemlerinin özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

**Tablo 3.** Kültürlenmiş et üretiminde kullanılan biyoreaktör sistemleri ve temel mühendislik özellikleri

| Biyoreaktör tipi                     | Temel çalışma prensibi                | Avantajları                | Sınırlamaları                 |
|--------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| <b>Karıştırmalı tank biyoreaktör</b> | Mekanik karıştırma ile homojenizasyon | Endüstriyel ölçek avantajı | Shear stress riski            |
| <b>Air-lift biyoreaktör</b>          | Gaz akışı ile sirkülasyon             | Daha düşük mekanik stres   | Oksijen transfer kontrolü zor |
| <b>Hollow-fiber biyoreaktör</b>      | Fiber membran sistemi                 | Kontrollü mikroçevre       | Büyük ölçek sınırlaması       |
| <b>Perfusion sistemler</b>           | Sürekli ortam değişimi                | Metabolik atık kontrolü    | Yüksek ortam tüketimi         |
| <b>Fed-batch sistemler</b>           | Kontrollü besin eklenmesi             | Metabolik optimizasyon     | Süreç kontrol karmaşıklığı    |

Kaynak: Humbird (2021), Allan ve ark., (2019) ve Kolkman ve ark., (2020) çalışmalarından derlenerek hazırlanmıştır.

Mikro taşıyıcı sistemlerin en önemli avantajı, adherent hücrelerin sürekli karıştırmalı biyoreaktörlerde çoğaltılmasını sağlamasıdır. Ancak bu sistemlerde karıştırma hızı dikkatli şekilde ayarlanmalıdır. Yetersiz karıştırma durumunda hücre kümelenmesi ve besin gradyanları oluşabilmekte; aşırı karıştırmada ise shear stres (kayma gerilimi) kaynaklı hücre hasarına neden olabilmektedir. Özellikle kas hücrelerinin zar yapıları mekanik strese karşı hassas olduğundan, biyoreaktör hidrodinamiği kültürlenmiş et üretiminin temel mühendislik problemlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Choi ve ark.,2023).

Oksijen transferi, büyük ölçekli kültürlenmiş et üretiminde en kritik parametrelerden biridir. Hızlı proliferasyon gösteren hücreler yüksek oksijen

tüketimine sahiptir. Ancak çözünmüş oksijenin ortam içerisindeki difüzyon kapasitesi sınırlıdır ve büyük hacimli sistemlerde oksijen gradyanları oluşmaktadır. Bu durum özellikle biyoreaktör merkez bölgelerinde hipoksik (düşük oksijenli) alanların oluşmasına yol açabilmektedir. Yetersiz oksijenlenme hücre proliferasyonunu (çoğalma) baskılamakta ve metabolik stres oluşturmaktadır. Bununla birlikte aşırı oksijenlenme durumunda ise reaktif oksijen türlerinin artmasına bağlı olarak oksidatif hasara yol açmaktadır (Kolkmann ve ark.,2020).

Besin maddelerinin homojen dağılımı ve metabolik atıkların uzaklaştırılması gibi problemler ölçeklendirme çalışmalarında önemli olmaktadır. Hücre metabolizması sonucunda oluşan laktat ve amonyak gibi bileşikler ortamda birikir ve hücre büyümesini baskılamaktadır. Özellikle yüksek hücre yoğunluğuna ulaşılan sistemlerde metabolik yük ciddi şekilde artmaktadır. Bu nedenle fed-batch (kesikli sistemler) ve perfusion (sürekli sistemler) üretim sistemleri gibi gelişmiş biyoproses stratejileri kültürlenmiş et üretiminde giderek daha fazla önem kazanmaktadır (Humbird, 2021).

Fed-batch sistemlerde kültür ortamına kontrollü şekilde besin eklenirken, perfusion sistemlerinde ortam sürekli yenilenmekte ve metabolik atıklar uzaklaştırılmaktadır. Perfusion sistemleri hücresel stabilite açısından daha avantaj sağlamakla birlikte, yüksek besiyeri tüketimi ve karmaşık proses kontrolü nedeniyle ekonomik açıdan önemli zorluklar taşımaktadır (Humbird, 2021; Kolkmann ve ark.,2020).

Üretim verimliliği üzerine kültürlenmiş et üretiminde kullanılan biyoreaktör tipi de etki etmektedir. Karıştırılmalı tank biyoreaktörleri (stirred-tank bioreactors), hava kaldırmalı sistemler (air-lift bioreactors) ve hollow-fiber biyoreaktörler farklı avantaj ve sınırlamalara sahiptir. Karıştırılmalı tank sistemleri endüstride yaygın kullanılmakta ve yüksek hacim avantajı sunmaktadır. Ancak mekanik karıştırma kaynaklı shear stress problemi önemli bir dezavantaj oluşturmaktadır. Hollow-fiber sistemler ise daha kontrollü mikro çevre sağlayabilmekte; ancak büyük ölçekli üretime adaptasyonları sınırlı kalabilmektedir (Allan ve ark.,2019).

Biyoreaktörlerde hücre yoğunluğu arttıkça difüzyon problemleri daha belirgin hale gelmektedir. Özellikle üç boyutlu doku oluşumuna geçildiğinde oksijen ve besin maddelerinin doku içerisine yeterli düzeyde ulaşması zorlaşmaktadır. Doğal kas dokusunda bu problem damar sistemi ile çözülmektedir. Ancak kültürlenmiş et sistemlerinde fonksiyonel vasküler yapıların oluşturulması hala önemli bir araştırma konusudur. Bu yüzden birçok mevcut sistem ince doku katmanları veya yapılandırılmış hibrit ürünler üretmeye odaklanmaktadır (Ben-Arye ve ark.,2020).

Enerji tüketimi kültürlenmiş et biyoreaktörlerinin sürdürülebilirliği üzerindeki engellerden biridir. Büyük hacimli biyoreaktörlerde sürekli karıştırma, sıcaklık

kontrolü, sterilizasyon ve gaz transferi yüksek enerji gerektirmektedir. Bazı yaşam döngüsü analizleri, kullanılan enerji kaynağına bağlı olarak kültürlenmiş etin çevresel avantajlarının değişebileceğini göstermektedir (Lynch ve Pierrehumbert, 2019).

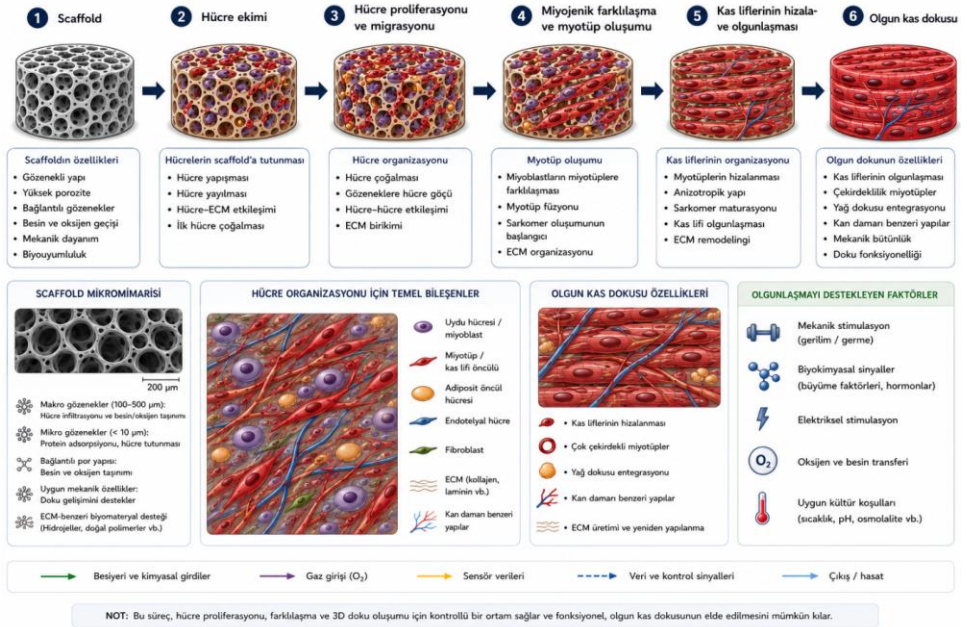
Sterilizasyon ve kontaminasyon kontrolü de büyük ölçekli üretimin temel problemleri arasındadır. Hayvansal hücre kültürleri bakteriyel ve fungal kontaminasyona oldukça duyarlıdır. Geleneksel biyofarmasötik üretimde yüksek sterilizasyon standartları uygulanmakta; ancak kültürlenmiş et üretiminde aynı düzeyde sterilizasyonun ekonomik olarak sürdürülebilir olup olmayacağı tartışmalıdır. Antibiyotik kullanımının ise gıda güvenliği açısından sınırlandırılması gerekmektedir.

Biyoreaktör ölçeklendirmesindeki en önemli sorunlardan biri, laboratuvar ölçeğinde başarılı olan biyolojik sistemlerin büyük hacimlerde aynı performansı göstermemesidir. Hücre davranışları yalnızca biyokimyasal faktörlerden değil, aynı zamanda fiziksel mikro çevreden de etkilenmektedir. Bu nedenle ölçek büyüdükçe hücresel heterojenlik artmakta ve ürün standardizasyonu zorlaşabilmektedir (Bodiou ve ark.,2020; Ben-Arye ve Levenberg, 2019).

Biyoreaktör sistemleri ile ölçeklendirme yaklaşımları, kültürlenmiş et üretiminin laboratuvar ölçeğinden endüstriyel üretime aktarılmasında temel teknolojik bileşenlerdir.

## **6. Scaffold (İskele) Sistemleri ve Doku Mühendisliği Yaklaşımları**

Kültürlenmiş et üretiminde hücre proliferasyonu tek başına yeterli değildir; hücrelerin organize, üç boyutlu ve doku benzeri yapılar oluşturabilmesi gerekmektedir. Doğal kas dokusu, hücresel organizasyon, bağ doku bileşenleri ve biyofiziksel sinyallerin birlikte şekillendirdiği kompleks bir biyolojik yapıdır. Scaffold yapıları, hücrelerin tutunmasını, çoğalmasını, hizalanmasını ve farklılaşmasını destekleyen üç boyutlu biyo-malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Bu sistemler yalnızca fiziksel destek sağlamakla kalmaz; aynı zamanda hücresel mikro çevreyi düzenleyerek doku oluşum sürecini yönlendirmektedir. Doğal kas dokusunda hücrelerin belirli doğrultular boyunca hizalanması, etin tekstürel yapısını ve mekanik özelliklerini doğrudan şekillendirmektedir. Scaffold tasarımı, kültürlenmiş etin duyu kalitesini doğrudan etkileyen temel faktörlerden biridir (Ben-Arye ve Levenberg, 2019; Choudhury ve ark.,2020). Scaffold tabanlı doku organizasyonu ve hücresel olgunlaşma süreci Şekil 3'te şematik olarak gösterilmiştir.



**Şekil 3. Scaffold tabanlı doku organizasyonu ve olgunlaşma süreci.** (Ben-Arye ve Levenberg 2019., Choudhury ve ark., 2020., Kang ve ark., 2021., Ostrovidov ve ark., 2014., Post, M. J., 2012)

Kültürlenmiş et sistemlerinde kullanılacak scaffold materyallerinin biyo uyumlu, yenilebilir, toksik olmayan ve hücre tutunmasını destekleyici özellikte olması gerekmektedir. Ayrıca bu materyallerin büyük ölçekli üretime uygun, ekonomik ve gıda regülasyonlarına uyumlu olması da önem taşımaktadır. Dolayısıyla scaffold seçiminde yalnızca biyolojik performans değil, endüstriyel uygulanabilirlik de dikkate alınmalıdır (Choudhury ve ark.,2020; Bomkamp ve ark.,2022).

Doğal polimerler scaffold üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kollajen, jelatin, fibrin, alginat, kitosan ve selüloz bazlı materyaller biyoyoumlulukları nedeniyle dikkat çekmektedir. Kollajen, doğal ekstraselüler matriksin temel bileşenlerinden biri olması nedeniyle hücre adezyonu açısından oldukça avantajlıdır. Ancak hayvansal kaynaklı olması ve yüksek maliyeti önemli sınırlamalar oluşturmaktadır. Jelatin ise kollajenin hidrolize formu olup daha ekonomik bir alternatif sunmaktadır (Bomkamp ve ark.,2022). Scaffold üretiminde kullanılan temel malzemeler Tablo 4’de özetlenmiştir.

**Tablo 4.** Kültürlenmiş et üretiminde kullanılan başlıca scaffold materyalleri ve temel özellikleri

| Scaffold materyali                | Yapısal özellik             | Avantajları                           | Sınırlamaları                    |
|-----------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| <b>Kollajen</b>                   | Doğal ECM proteini          | Güçlü hücre adezyonu                  | Yüksek maliyet, hayvansal kaynak |
| <b>Jelatin</b>                    | Hidrolize kollajen          | Biyouyumlu, ekonomik                  | Mekanik dayanıklılık sınırlı     |
| <b>Alginat</b>                    | Polisakkarit bazlı hidrojel | Yüksek su tutma kapasitesi            | Hücre adezyonu sınırlı olabilir  |
| <b>Kitosan</b>                    | Doğal biyopolimer           | Biyobozunur ve biyouyumlu             | Mekanik stabilite problemi       |
| <b>Selüloz bazlı sistemler</b>    | Bitkisel kaynaklı yapı      | Sürdürülebilir ve ekonomik            | Hücrel etkileşim sınırlı         |
| <b>Elektrospın nanofiberler</b>   | Lifli yönlendirilmiş yapı   | Kas hizalanmasını destekler           | Ölçeklendirme zorluğu            |
| <b>Hibrit scaffold sistemleri</b> | Çok bileşenli yapılar       | Optimize biyolojik ve mekanik özellik | Üretim karmaşıklığı              |

Kaynak: Ben-Arye and Levenberg (2019), Bomkamp ve ark., (2022), Choudhury ve ark., (2020), Ostrovidov ve ark., (2019) ve Kang ve ark., (2021) çalışmalarından derlenerek hazırlanmıştır.

Alginat gibi polisakkarit bazlı sistemler, özellikle hidrojel üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Hidrojeller yüksek su tutma kapasitesine sahip üç boyutlu ağ yapılarıdır ve hücrelerin doğal doku benzeri ortamda gelişmesine olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte bazı hidrojel sistemleri mekanik dayanıklılık açısından yetersiz kalmakta ve gerçek et tekstürünü tam olarak taklit edememektedir. Bu yüzden son yıllarda hibrit scaffold sistemleri geliştirilmekte; biyolojik ve mekanik özellikleri optimize edilmiş çok bileşenli yapılar üzerinde çalışılmaktadır (Choudhury ve ark.,2020; Bomkamp ve ark.,2022).

Scaffold sistemlerinin gözenek yapısı (porosity), hücre davranışlarını belirleyen önemli faktörlerden biridir. Yeterli porozite sağlanmadığında oksijen ve besin difüzyonu sınırlanmakta; bu durum özellikle kalın doku yapılarında nekrotik bölgelerin oluşmasına yol açmaktadır. Buna karşılık aşırı porozite ise mekanik stabilitenin azalmasına neden olmaktadır. Scaffold tasarımında biyolojik uyumluluk ile mekanik dayanıklılık arasında hassas bir denge kurulması gerekmektedir (Ong ve ark.,2021; Choudhury ve ark.,2020).

Scaffold tasarımı, kas hücrelerinin kontrollü şekilde hizalanmasını destekleyecek yapısal özelliklere sahip olmalıdır. Doğal kas dokusunda miyofiberler belirli yönelimler boyunca organize olmaktadır ve bu düzen etin lifli yapısını oluşturmaktadır. Rastgele organize olmuş hücre kümeleri orjinal et tekstürünü oluşturamamaktadır. Bu nedenle mikro desenlendirilmiş yüzeyler, nanofiber yapılar ve yönlendirilmiş scaffold sistemleri geliştirilmektedir. Özellikle elektrospın (electrospinning) yöntemiyle üretilen nanofiber yapılar, kas

liflerinin hizalanmasını destekleyen umut verici sistemler arasında yer almaktadır (Ostrovidov ve ark.,2019; Kai ve ark.,2011).

Mekanik ve biyofiziksel uyarılar, hücrelerin organizasyonu ve doku olgunlaşması üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Doğal kas dokusu sürekli mekanik yük altında gelişmektedir. (Boehler ve ark.,2019). Bu nedenle kültürlenmiş et sistemlerinde mekanik gerilim uygulamaları, hücrelerin miyojenik farklılaşmasını ve protein sentezini artırabilmektedir. Benzer şekilde elektriksel stimülasyon da kas hücrelerinin olgunlaşmasını desteklemekte ve kas benzeri kontraktıl yapıların gelişimine katkı sağlamaktadır (Boehler ve ark.,2019; Ostrovidov ve ark.,2019).

Üç boyutlu biyo baskı (3D bioprinting) teknolojileri, kültürlenmiş et üretiminde dikkat çeken yeni nesil yaklaşımlar arasında yer almaktadır. Bu sistemlerde hücreler ve biyomalzemeler belirli geometrilerde katmanlar halinde yerleştirilerek kontrollü doku yapıları oluşturulmaktadır. 3D biyo baskı sayesinde kas ve yağ hücreleri belirli oranlarda ve kontrollü şekilde organize edilebilmektedir. Bu yaklaşım özellikle steak benzeri yapılandırılmış ürünlerin geliştirilmesi açısından önem taşımaktadır. Ancak baskı hızı, hücre canlılığı, biyomürekkep (bioink) stabilitesi ve büyük ölçekli üretim kapasitesi gibi konular henüz tam olarak çözülebilmüş değildir (Ng ve ark.,2020; Choudhury ve ark.,2020).

Kültürlenmiş et sistemlerinde fonksiyonel vasküler yapıların oluşturulamaması, en önemli mühendislik problemlerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Doğal kas dokusunda damar sistemi, hücrelere oksijen ve besin taşınmasını sağlamaktadır. Ancak laboratuvar ortamında oluşturulan kalın dokularda yeterli vasküler ağ bulunmadığında iç bölgelerde oksijen yetersizliği gelişebilmektedir (Moritz ve ark.,2015; Ben-Arye ve Levenberg, 2019).

Scaffold sistemlerinin yenilebilir olması da kültürlenmiş et açısından önemli bir farklılıktır. Rejeneratif tıpta kullanılan bazı biyomalzemeler biyolojik olarak uygun olsa da gıda tüketimi açısından uygun olmamaktadır. Bu yüzden kültürlenmiş et uygulamalarında kullanılan scaffold materyallerinin gıda güvenliği, toksisite ve sindirilebilirlik açısından değerlendirilmesi gerekmektedir (Choudhury ve ark.,2020; Bomkamp ve ark.,2022).

Maliyet ve ölçeklenebilirlik, scaffold teknolojilerinin endüstriyel uygulanabilirliğini belirleyen temel faktörlerdir. Laboratuvar ölçeğinde başarılı sonuç veren birçok biyomalzeme, büyük ölçekli gıda üretimi için ekonomik olmamaktadır. Kültürlenmiş et sektörünün geleceği açısından düşük maliyetli, sürdürülebilir ve seri üretime uygun scaffold sistemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir (Bomkamp ve ark.,2022; Humbird, 2021).

## **7. Ürün Kalitesi, Tekstür ve Duyusal Özelliklerin Oluşturulması**

Kültürlenmiş et teknolojisinin başarısı biyolojik olarak kas hücresi üretilmesiyle sınırlı değildir. Aynı zamanda gerçek etin duyuşal ve yapısal özelliklerinin oluşturulmasına da bağlıdır. Geleneksel et; kas lifleri, yağ dokusu, bağ doku elemanları, su, pigmentler ve çeşitli metabolitlerin kompleks organizasyonu sonucunda oluşan çok boyutlu bir biyolojik yapıdır. Kültürlenmiş et sistemlerinde protein içeriğinin oluşturulmasının yanı sıra tekstür, aroma, renk, sululuk ve ağızda bıraktığı his gibi parametrelerin de optimize edilmesi gerekmektedir (Fraeye ve ark.,2020).

Etin tekstürel özellikleri büyük ölçüde kas liflerinin organizasyonu, lif yoğunluğu ve bağ doku yapısıyla ilişkilidir. Doğal kas dokusunda miyofibriller proteinler belirli doğrultular boyunca oluşmakta ve bu yapı etin lifli karakterini belirlemektedir. Kültürlenmiş et sistemlerinde ise hücrelerin düzensiz büyümesi sonucu homojen fakat doğal olmayan yumuşak yapılar oluşmaktadır. Bu nedenle kas liflerinin hizalanması ve çok çekirdekli miyotüplerin oluşumu, ürün tekstürünü doğrudan etkilemektedir (Ben-Arye ve ark.,2020; Boehler ve ark.,2019).

Mekanik stimülasyon uygulamaları, miyofibril organizasyonu ve kas dokusunun yapısal olgunlaşmasını destekleyen önemli yaklaşımlar arasında yer almaktadır. Doğal kas dokusu sürekli fiziksel gerilim altında geliştiğinden, kültürlenmiş et sistemlerinde uygulanan mekanik yükler miyofibril organizasyonunu ve protein sentezini artırabilmektedir (Boehler ve ark.,2019; Khodabukus ve ark.,2019).

Kültürlenmiş etin duyuşal kalitesinde yağ dokusu merkezi rol oynamaktadır. Geleneksel ette intramüsküler yağ dağılımı, aroma oluşumu, sululuk ve ağız hissi üzerinde belirleyici etkiye sahiptir. Yağ hücrelerinin ürüne dahil edilmesi, özellikle aroma prekürsörlerinin oluşması için değerlidir. Yağ hücreleri pişirme sırasında aldehytler, ketonlar ve uçucu aroma bileşiklerinin oluşumuna katkı sağlayarak et aromasının gelişiminde önemli rol üstlenmektedir (Fraeye ve ark.,2020; Hocquette, 2016).

Renk oluşumu da kültürlenmiş et teknolojisindeki önemli problemlerden biridir. Geleneksel ette kırmızı rengin temel kaynağı miyoglobindir. Ancak kültür ortamında büyütülen hücrelerde miyoglobin düzeyi doğal kas dokusuna göre düşük kalmaktadır. Miyoglobin sentezinin artırılması amacıyla oksijen konsantrasyonunun düzenlenmesi, demir biyoyararlanımının düzenlenmesi ve diğer koşulların kontrol edilmesi, kültürlenmiş et sistemlerinde daha doğal kas renginin oluşturulması için temel stratejiler arasında kabul görmüştür (Fraeye ve ark.,2020; Hocquette, 2016).

Bir diğer önemli konu da su tutma kapasitesi, pişirme kaybı ve sululuk gibi parametrelerdir. Doğal ette suyun büyük bölümü miyofibriller yapı içerisinde tutulmaktadır. Kültürlenmiş et sistemlerinde yeterli protein organizasyonu oluşmadığında su tutma kapasitesi azalmakta ve ürün yapısal olarak stabilitesini

koruyamamaktadır. Dolayısıyla hücre yoğunluğu, protein organizasyonu ve scaffold yapısı birlikte değerlendirilmelidir (Fraeye ve ark.,2020; Hocquette, 2016).

Bağ doku bileşenleri, etin mekanik özelliklerini belirleyen önemli faktörlerdir. Kollajen ve elastin gibi proteinler etin sertliği ve çiğneme özellikleri üzerinde etkilidir. Kültürlenmiş et sistemlerinde bağ doku oluşumunun eksik kalması, ürünün doğal etten farklı algılanmasına neden olabilmektedir. Dolayısıyla fibroblastların ko-kültür sistemlerine dahil edilmesi ve kontrollü ECM üretiminin desteklenmesi, doğal ete daha yakın mekanik özelliklerin oluşturulması için gerekmektedir (Choi ve ark.,2023).

Aroma oluşumu kültürlenmiş et teknolojisinin en karmaşık alanlarından biridir. Et aromasının önemli bir kısmı pişirme esnasında gerçekleşen Maillard reaksiyonları ve lipid oksidasyonu neticesinde oluşmaktadır. Bu reaksiyonların gerçekleşebilmesi için uygun aminoasit profili, indirgen şekerler ve yağ bileşenlerinin belirli oranlarda bulunması gerekmektedir. Ancak kültürlenmiş et sistemlerinde metabolik yapı doğal kas dokusundan farklı olduğundan aroma profili de değişebilmektedir (Hocquette, 2016; Fraeye ve ark.,2020).

Protein kalitesi açısından teorik olarak geleneksel ete benzer ürünler elde edilmekte fakat yağ asidi kompozisyonu, vitamin içeriği ve biyoyararlanım gibi parametreler kültür koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Bu durum aynı zamanda kültürlenmiş et ürünlerinin besin içeriğinin yeniden formüle edilebilmesine olanak sağlamaktadır. Örneğin omega-3 yağ asitleri açısından zenginleştirilmiş veya doymuş yağ içeriği azaltılmış ürünlerin geliştirilmesi mümkün olmaktadır (Fraeye ve ark.,2020; Post ve ark.,2020).

Tüketici kabulü, kültürlenmiş et teknolojisinin ticari başarısını belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Tüketici araştırmaları, insanların kültürlenmiş ete yönelik yaklaşımlarının yalnızca ürün özelliklerine değil, etik algı, güvenlik endişesi, algılanan doğallık ve fiyat gibi faktörlere de bağlı olduğunu göstermektedir. Özellikle “yapay”, “sentetik” veya “laboratuvar ürünü” algısı, tüketici kabulünü sınırlandıran temel psikolojik bariyerler arasında yer almaktadır (Bryant ve Dillard, 2019). Gerçek et benzeri lif yapısı, dengeli yağ dağılımı, uygun aroma profili ve kabul edilebilir pişirme özellikleri oluşturulmadan kültürlenmiş etin geniş ölçekli ticari başarıya ulaşması oldukça zor görünmektedir.

## **8. Gıda Güvenliği, Regülasyon ve Etiketleme Yaklaşımları**

Kültürlenmiş et teknolojisinin bilimsel olarak uygulanabilir hale gelmesi, bu ürünlerin güvenliği, regülasyonu ve tüketiciye nasıl sunulacağına ilişkin tartışmaları da beraberinde getirmiştir. Geleneksel hayvansal üretim sistemlerinden farklı bir biyoteknolojik altyapıya sahip olması nedeniyle kültürlenmiş et, mevcut gıda mevzuatlarının sınırlarını zorlayan yeni nesil bir



ürün kategorisi olarak değerlendirilmektedir. Bu yüzden kültürlenmiş et sadece biyolojik üretim süreçleri bakımından değil, aynı zamanda güvenlik değerlendirmeleri, üretim standardizasyonu, etiketleme politikaları ve tüketici iletişimi açısından da kapsamlı biçimde ele alınması gerekmektedir.

Kültürlenmiş etin gıda güvenliği açısından en önemli avantajlarından biri, kontrollü üretim ortamlarında üretilmesidir. Geleneksel hayvancılık sistemlerinde hayvan hastalıkları, zoonotik patojenler, çevresel kontaminasyon ve antibiyotik kalıntıları önemli risk faktörleri arasında yer almaktadır. Kontrollü hücre kültürü sistemlerinin teorik olarak bu risklerin bir kısmını azaltabileceği düşünülmektedir. Özellikle Salmonella, Campylobacter ve Escherichia coli O157:H7 gibi patojenlerle ilişkili kontaminasyon riskinin daha düşük olabileceği öne sürülmektedir (Post, 2014).

Bununla birlikte kültürlenmiş et sistemleri kendilerine özgü yeni güvenlik problemleri de ortaya çıkarmaktadır. Hücre kültürü süreçlerinde kullanılan büyüme faktörleri, biyolojik olarak aktif bileşikler, scaffold materyalleri ve kültür ortamı bileşenlerinin güvenliği dikkatle değerlendirilmelidir. Ayrıca uzun süreli hücre kültürlerinde genetik stabilitenin korunması büyük önem taşımaktadır. Hücrelerin yüksek proliferasyon kapasitesi sırasında mutasyon birikimi veya fenotipik değişimler oluşabilmekte; bu durum ürün standardizasyonu ve güvenlik açısından soru işaretleri doğurmaktadır (Stephens ve ark.,2018).

Mikrobiyal kontaminasyon kontrolü, kültürlenmiş et üretiminde önemli bir konudur. Hayvansal hücre kültürleri bakteriyel ve fungal kontaminasyona oldukça duyarlıdır. Geleneksel biyofarmasötik üretim sistemlerinde yüksek sterilizasyon standartları uygulanmasına rağmen, kültürlenmiş et üretiminde aynı seviyede steril koşulların ekonomik sürdürülebilirliği tartışmalıdır. Özellikle büyük hacimli biyoreaktör sistemlerinde kontaminasyon riski artmaktadır. Bu nedenle proses hijyeni, kapalı sistem biyoreaktör tasarımları ve gerçek zamanlı biyosensör sistemleri öncelikli araştırma alanları haline gelmiştir (Bhat ve ark.,2019; Humbird, 2021).

Antibiyotik kullanımı da kültürlenmiş et teknolojisinde dikkat edilmesi gereken tartışmalı konulardan biridir. Hücre kültürlerinde kontaminasyonu önlemek amacıyla antibiyotik kullanımı yaygın olmakla birlikte, gıda üretiminde antibiyotik kalıntıları ve direnç gelişiminin ciddi riskler taşıdığı bilinmektedir. Güncel yaklaşımlar, antibiyotiksiz üretim sistemlerinin geliştirilmesine odaklanmaktadır. Özellikle kapalı biyoreaktör sistemleri ve gelişmiş sterilizasyon stratejileri, antibiyotik ihtiyacını azaltmayı amaçlamaktadır (Bhat ve ark.,2019; Ong ve ark.,2021).

Kültürlenmiş etin besinsel eşdeğerliği regülasyon açısından kritik değerlendirme alanlarından biridir. Ürünün aminoasit kompozisyonu, yağ asidi profili, vitamin içeriği ve biyoyararlanım özelliklerinin geleneksel et ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Özellikle üretim

sürecinde kullanılan kültür ortamı bileşenleri ve hücrel metabolizma koşulları, ürünün nihai besinsel profilini etkileyebilmektedir. Bu nedenle kültürlenmiş et ürünlerinin güvenlik ve etiketleme süreçlerinde besinsel karakterizasyonun standartlaştırılması önemli bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir (Fraeye ve ark.,2020; Post ve ark.,2020).

**Tablo 5.** Kültürlenmiş Et ve Geleneksel Etin Besinsel Eşdeğerlik Açısından Karşılaştırılması

| Parametre                      | Geleneksel Et                       | Kültürlenmiş Et                                   | Regülasyonel Önemi              |
|--------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------|
| <b>Aminoasit profili</b>       | Doğal kas protein yapısına bağlıdır | Hücre tipi ve kültür koşullarına göre değişebilir | Besinsel eşdeğerlik doğrulaması |
| <b>Protein biyoyararlanımı</b> | Yüksek ve iyi tanımlanmıştır        | Sindirilebilirlik verileri sınırlıdır             | Güvenlik değerlendirmesi        |
| <b>Yağ asidi profili</b>       | Hayvan beslenmesine bağlıdır        | Kontrollü şekilde modifiye edilebilir             | Sağlık beyanları ve etiketleme  |
| <b>Vitamin içeriği</b>         | Doğal olarak bulunur                | Takviye gerektirebilir                            | Mikronutrient standardizasyonu  |
| <b>Mineral kompozisyonu</b>    | Kas dokusuna özgü doğal dağılım     | Kültür ortamına bağlı değişebilir                 | Besin etiketi doğruluğu         |
| <b>Myoglobin düzeyi</b>        | Yüksek                              | Daha düşük olabilir                               | Renk ve tüketici algısı         |
| <b>Enerji değeri</b>           | Tür ve yağ oranına bağlıdır         | Formülasyona göre değişebilir                     | Besinsel deklarasyon            |

Regülasyon süreçleri ülkeler arasında farklılık göstermektedir. Singapur, 2020 yılında kültürlenmiş tavuk ürününe ticari satış onayı veren ilk ülke olmuştur. Amerika Birleşik Devletleri’nde FDA ve USDA ortak regülasyon modeli geliştirmiştir. FDA hücre toplama, hücre bankası ve proliferasyon süreçlerinden sorumlu olurken; USDA üretim sonrası işleme, etiketleme ve ticari denetim süreçlerini yürütmektedir (FDA, 2022).

Avrupa Birliği’nde ise kültürlenmiş et ürünleri “Novel Food Regulation” kapsamında değerlendirilmektedir. Bu çerçevede ürünün güvenliği, üretim süreci, toksikolojik özellikleri, besinsel yapısı ve tüketici üzerindeki olası etkileri çok yönlü şekilde değerlendirilmektedir. Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (EFSA), kültürlenmiş et ürünlerinin değerlendirilmesinde vaka bazlı yaklaşım benimsemekte ve her ürünün ayrı değerlendirilmesi gerektiğini belirtmektedir. Besinsel eşdeğerliğin güvenilir şekilde değerlendirilebilmesi için ürün bileşiminin analitik yöntemlerle kapsamlı olarak karakterize edilmesi gerekmektedir.

**Tablo 6.** Kültürlenmiş Etin Besinsel Karakterizasyonunda Kullanılan Başlıca Analitik Yöntemler

| Analiz Parametresi     | Kullanılan Teknikler          | Değerlendirme Amacı                             |
|------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------|
| Aminoasit profili      | HPLC, LC-MS/MS                | Protein kalitesi ve esansiyel aminoasit dengesi |
| Yağ asidi kompozisyonu | GC-MS                         | Lipid profilinin belirlenmesi                   |
| Protein yapısı         | SDS-PAGE, proteomik analizler | Yapısal protein karakterizasyonu                |
| Vitamin analizi        | HPLC                          | Mikronutrient doğrulaması                       |
| Mineral içerik         | ICP-MS, AAS                   | Mineral kompozisyon analizi                     |
| Biyoyararlanım         | İn vitro sindirim modelleri   | Sindirilebilirlik değerlendirmesi               |
| Metabolit profili      | Metabolomik analizler         | Hüresel metabolizma etkilerinin belirlenmesi    |
| Renk bileşenleri       | Spektrofotometrik analizler   | Myoglobin ve renk stabilitesi                   |

Etiketleme konusunun nasıl olacağı da kültürlenmiş et alanında tartışılan bir konudur. “Et” teriminin yalnızca geleneksel hayvansal üretimden elde edilen ürünler için kullanılması gerektiğini savunan görüşler bulunmaktadır. Buna karşılık kültürlenmiş et üreticileri, ürünün gerçek hayvan hücrelerinden türetildiğini ve bu nedenle “et” olarak tanımlanmasının uygun olduğunu ileri sürmektedir. Bu tartışma yalnızca terminolojik değil; aynı zamanda tüketici algısı, pazarlama stratejileri ve regülasyon açısından da önem taşımaktadır (Chriki ve Hocquette, 2020).

Tüketici güveni açısından üretim süreçlerinin şeffaflığı gerekmektedir. Özellikle “laboratuvar ortamında üretilmiş gıda” algısı, bazı tüketicilerde güvensizlik oluşturmaktadır. Yapılan çalışmalar, tüketici kabulünün büyük ölçüde bilgi düzeyi ve algılanan güvenlikle ilişkili olduğunu göstermektedir (Bryant ve Barnett, 2018).

Dini değerlendirmeler de kültürlenmiş etin geleceği açısından önemli tartışma alanları arasında yer almaktadır. Kullanılan hücre kaynağı, kültür ortamı bileşenleri ve üretim süreci, dini otoritelerin değerlendirmelerinde belirleyici olmaktadır. Dolayısıyla kültürlenmiş et aynı zamanda sosyokültürel bir konu olarak da değerlendirilmektedir (Stephens ve ark.,2018).

Standardizasyon eksikliği, kültürlenmiş et regülasyonlarının önündeki temel sorunlardan biridir. Günümüzde hücre hattı seçimi, büyüme ortamı kompozisyonu, scaffold sistemleri ve biyoreaktör koşulları açısından ortak standartlar henüz tam olarak oluşmamıştır. Bu durum ürünler arasında biyolojik ve yapısal farklılıklar oluşmasına neden olduğundan uluslararası üretim standartlarının geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır (Stephens ve ark.,2018; Ong ve ark., 2021).

## 9. Sürdürülebilirlik, Etik Yaklaşımlar ve Tüketici Kabulü

Kültürlenmiş et teknolojisinin ortaya çıkışındaki temel sebeplerden biri, geleneksel hayvansal üretim sistemlerinin çevresel ve etik açıdan giderek daha fazla sorgulanmasıdır. Artan dünya nüfusu, protein talebindeki yükseliş, iklim değişikliği, doğal kaynak kullanımı ve hayvan refahı tartışmaları, alternatif protein üretim sistemlerine yönelik ilgiyi hızlandırmıştır. Bu bağlamda kültürlenmiş et, yalnızca yeni bir biyoteknolojik ürün değil; aynı zamanda geleceğin gıda sistemlerinin nasıl şekilleneceğine ilişkin geniş ölçekli bir tartışmanın merkezinde yer almaktadır (Post, 2012; Tuomisto ve Teixeira de Mattos, 2011).

Geleneksel hayvancılık sistemleri; yüksek arazi kullanımı, yoğun su tüketimi, yem ihtiyacı ve sera gazı emisyonları ile ilişkilendirilmektedir. Özellikle sığır yetiştiriciliğinden kaynaklanan metan emisyonları, hayvansal üretimin çevresel yükünün önemli bölümünü oluşturmaktadır. Bunun yanı sıra yem üretimi için kullanılan tarım alanları, ormansızlaşma ve biyolojik çeşitlilik kaybı gibi çevresel problemlerle de bağlantılıdır (Tuomisto ve Teixeira de Mattos, 2011).

Kültürlenmiş et teknolojisinin teorik olarak daha düşük arazi kullanımına ihtiyaç duyabileceği ve hayvansal üretimin çevresel yükünü azaltabileceği öne sürülmektedir. Bazı yaşam döngüsü analizleri, kültürlenmiş et sistemlerinin geleneksel sığır yetiştiriciliğine kıyasla daha düşük arazi ve su kullanımı sağlayabileceğini göstermektedir (Mattick ve ark.,2015). Bununla birlikte bu avantajların mutlak olmadığı ve üretimde kullanılan enerji kaynağına bağlı olarak değişebileceği de vurgulanmaktadır. Özellikle biyoreaktör sistemlerinin yüksek enerji gereksinimi, kültürlenmiş etin çevresel sürdürülebilirliği konusunda önemli tartışmalara yol açmıştır. Sürekli sıcaklık kontrolü, sterilizasyon, gaz transferi ve ortam üretimi gibi süreçler yüksek enerji tüketimine neden olmaktadır. Eğer bu enerji fosil kaynaklardan sağlanıyorsa, kültürlenmiş et sistemlerinin uzun vadede önemli karbon emisyonlarına yol açabileceği belirtilmektedir (Lynch ve Pierrehumbert, 2019). Bu çerçevede kültürlenmiş etin çevresel sürdürülebilirliği, büyük ölçüde enerji altyapısının niteliği ve üretim süreçlerinin verimliliği ile yakın ilişkilidir.

Kültür ortamlarının sürdürülebilirliği de önemli bir değerlendirme konusudur. Aminoasitler, büyüme faktörleri ve rekombinant proteinlerin üretimi ciddi kaynak kullanımı gerektirebilmektedir. Özellikle yüksek saflıkta biyolojik bileşenlerin üretimi için gerekli enerji ve ham madde tüketimi yüksektir. Kültürlenmiş etin gerçekten sürdürülebilir bir alternatif olabilmesi için yalnızca son ürün değil, tüm üretim zincirinin değerlendirilmesi gerekmektedir (Humbird, 2021; Specht ve ark.,2018).

Hayvan refahı, kültürlenmiş et teknolojisinin en güçlü etik argümanlarından biri olarak görülmektedir. Geleneksel hayvancılıkta büyük ölçekli üretim sistemleri, hayvanların yaşam koşulları ve kesim süreçleri uzun yıllardır etik tartışmaların merkezinde yer almaktadır. Kültürlenmiş et yaklaşımı teorik olarak

sınırlı sayıda biyopsi işlemi ile büyük miktarda et üretimine olanak sağlayabileceğinden, hayvan kesiminin azaltılabileceği öne sürülmektedir (Post, 2012). Ancak kültürlenmiş et sistemlerinin etik açıdan tamamen problemsiz olduğu söylenemez. Özellikle erken dönem çalışmalarda fetal bovine serum (FBS) kullanılması önemli eleştirilere yol açmıştır. FBS üretimi sırasında hayvansal kaynak kullanılması, kültürlenmiş etin etik avantajlarına ilişkin tartışmaları artırmıştır. Bu nedenle serum-free ve hayvansal bileşen içermeyen sistemlerin geliştirilmesi, yalnızca ekonomik değil, aynı zamanda etik bir gereklilik haline gelmiştir (Van der Valk ve ark.,2018).

Kültürlenmiş etin toplum tarafından kabul edilmesi, teknolojinin geleceğini belirleyen en kritik faktörlerden biridir. Yapılan çalışmalar, tüketicilerin kültürlenmiş ete yönelik yaklaşımlarının oldukça heterojen olduğunu göstermektedir. Bazı tüketiciler çevresel ve etik avantajlar nedeniyle bu ürünlere olumlu yaklaşırken, bazıları algılanan doğallığın bozulduğunu düşünmektedir (Bryant ve Barnett, 2018). “Yapay”, “sentetik” veya “laboratuvar ürünü” gibi algılar, kültürlenmiş etin tüketici kabulünü sınırlayan temel psikolojik engeller arasında yer almaktadır.

Terminoloji seçimi bile tüketici algısını önemli ölçüde etkilemektedir. Araştırmalar, “cultivated meat” ifadesinin “lab-grown meat” veya “artificial meat” ifadelerine kıyasla tüketiciler tarafından daha olumlu algılandığını göstermektedir (Siegrist ve ark.,2018).

Fiyat faktörü de tüketici kabulü açısından belirleyicidir. İlk kültürlenmiş hamburger prototipinin yaklaşık 250.000 Euro maliyetle üretilmiş olması, teknolojinin ekonomik uygulanabilirliği konusunda ciddi soru işaretleri doğurmuştur (Post, 2014).

Geleneksel hayvancılık sektöründe çalışan milyonlarca insanın geleceği, kırsal üretim sistemlerinin dönüşümü ve biyoteknoloji şirketlerinin gıda sistemindeki rolü önemli sosyoekonomik sorular ortaya çıkarmaktadır. Bazı araştırmacılar kültürlenmiş etin mevcut gıda sistemindeki güç dengelerini değiştirebileceğini ve üretimin daha merkezi hale gelebileceğini ileri sürmektedir (Mattick ve ark.,2015; Stephens ve ark.,2018).

## **10. Endüstriyel Ölçeklendirme, Ekonomik Zorluklar ve Gelecek Perspektifleri**

Kültürlenmiş et teknolojisinin bilimsel olarak mümkün hale gelmiş olması, bu sistemlerin endüstriyel olarak sürdürülebilir ve ekonomik ölçekte uygulanabileceği anlamına gelmemektedir. Günümüzde kültürlenmiş et alanındaki en büyük problem, laboratuvar ölçeğinde başarılı sonuç veren biyolojik sistemlerin büyük hacimli ve ekonomik üretim süreçlerine dönüştürülebilmesidir. Kültürlenmiş et teknolojisinin geleceği, büyük ölçüde ölçeklendirme kapasitesi ve proses verimliliğinin artırılmasına bağlıdır.

Laboratuvar koşullarında birkaç gram düzeyinde doku üretimi biyolojik olarak gerçekleştirilebilmekte; ancak ticari düzeyde üretim için tonlarca hücressel biyokütlenin kontrollü şekilde oluşturulması gerekmektedir. Özellikle hücre yoğunluğu arttıkça oksijen transferi, besin difüzyonu, metabolik atık birikimi ve homojen kültür koşullarının korunması giderek zorlaşmaktadır (Humbird, 2021).

Kültürlenmiş et üretiminde maliyetin en büyük kısmını kültür ortamı oluşturmaktadır. Özellikle büyüme faktörleri, rekombinant proteinler ve yüksek saflıktaki ortam bileşenleri üretim maliyetini ciddi şekilde artırmaktadır. Bazı analizler, toplam üretim maliyetinin büyük bölümünün yalnızca büyüme faktörlerinden kaynaklandığını göstermektedir (Specht ve ark.,2018). Büyük hacimli steril biyoreaktör sistemleri yüksek yatırım gerektirmektedir. Ayrıca enerji tüketimi, gaz transfer sistemleri, sterilizasyon süreçleri ve sürekli proses kontrolü işletme maliyetlerini artırmaktadır. Geleneksel fermantasyon sistemlerinden farklı olarak hayvansal hücreler çok daha hassas olduğundan, biyoreaktör tasarımlarının daha da geliştirilmesi gerekmektedir (Stephens ve ark.,2018).

Ölçek büyüdükçe hücressel heterojenlik problemi artmaktadır. Laboratuvar ölçeğinde kontrollü şekilde büyüyen hücreler, büyük hacimli sistemlerde aynı proliferasyon ve farklılaşma performansını gösteremeyebilir. Özellikle oksijen ve besin gradyentleri, hücrelerin farklı metabolik durumlara geçmesine neden olabilmektedir. Dolayısıyla ürün standardizasyonu zorlaşmakta ve kalite kontrol süreçleri karmaşık hale gelmektedir (Humbird, 2021; Allan ve ark.,2019).

Kültürlenmiş etin ekonomik olarak uygulanabilir hale gelmesi için hücre yoğunluğunun artırılması gerekmektedir. Ancak yüksek hücre yoğunluğu metabolik stresin artmasına yol açmaktadır. Hücreler hızlı proliferasyon sırasında yüksek miktarda glukoz ve aminoasit tüketmekte; bunun sonucunda laktat ve amonyak gibi metabolik yan ürünler ortamda birikmektedir. Bu durum hücressel canlılığı baskılamakta ve üretim verimliliğini düşürebilmektedir (Humbird, 2021; Specht ve ark.,2018).

Serum-free kültür ortamlarının geliştirilmesi gelecekteki en kritik dönüşüm alanlarından biridir. FBS kullanımının azaltılması yalnızca etik açıdan değil, ekonomik açıdan da büyük önem taşımaktadır. Günümüzde rekombinant büyüme faktörleri halen oldukça pahalıdır ve büyük ölçekli üretimde ciddi maliyet oluşturmaktadır (Kolkman ve ark.,2020; Specht ve ark.,2018).

Otomasyon ve yapay zeka destekli biyoproses kontrol sistemleri kültürlenmiş etin geleceğinde önemli rol oynayacaktır. Gerçek zamanlı sensör sistemleri ile hücressel metabolizma, pH, oksijen düzeyi ve besin tüketimi sürekli izlenebilmekte; bu veriler kullanılarak proses optimizasyonu yapılabilmektedir. Özellikle machine learning temelli modellerin biyoreaktör kontrol sistemlerine entegre edilmesi, üretim verimliliğini artırabilecek yaklaşımlar arasında değerlendirilmektedir (Allan ve ark.,2019; Humbird, 2021).

Üç boyutlu biyobaskı teknolojileri de gelecek perspektifleri açısından dikkat çekmektedir. Günümüzde çoğu kültürlenmiş et ürünü yapılandırılmamış veya hibrit ürünler şeklinde geliştirilirken, gelecekte steak benzeri kompleks yapıların oluşturulması hedeflenmektedir. Bunun için çok katmanlı doku organizasyonu, vasküler benzeri yapılar ve kontrollü yağ dağılımı gerekmektedir. Ancak bu yapıların büyük ölçekli üretimi hala mühendislik problemleri içermektedir (Ng ve ark., 2020).

Enerji verimliliği kültürlenmiş etin geleceğini belirleyen temel faktörlerden biri olacaktır. Kültürlenmiş etin çevresel avantaj sağlayabilmesi için üretim süreçlerinin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla desteklenmesi gerekmektedir. Aksi halde yüksek enerji tüketimi, teknolojinin sürdürülebilirlik iddialarını sınırlandıracaktır (Lynch ve Pierrehumbert, 2019). Kültürlenmiş etin endüstriyel ölçeklendirilmesini sınırlayan başlıca teknik ve ekonomik kısıtlar Tablo 5'te özetlenmiştir.

**Tablo 7.** Kültürlenmiş et teknolojisinin temel teknik zorlukları ve çözüm yaklaşımları

| <b>Teknik problem</b>            | <b>Açıklama</b>                       | <b>Güncel yaklaşım</b>               | <b>çözüm</b> |
|----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------|
| <b>Oksijen transferi</b>         | Büyük hacimde difüzyon yetersizliği   | Gelişmiş tasarımı                    | biyoreaktör  |
| <b>Shear stress</b>              | Karıştırma kaynaklı hücre hasarı      | Düşük stresli hidrodinamik sistemler |              |
| <b>Serum bağımlılığı</b>         | FBS maliyet ve etik sorunu            | Serum-free ortam geliştirme          |              |
| <b>Yüksek maliyet</b>            | Büyüme faktörleri ve enerji giderleri | Rekombinant sistemleri               | üretim       |
| <b>Vaskülarizasyon eksikliği</b> | Kalın dokuda besin transfer problemi  | Mikrokanal ve sistemleri             | biyobaskı    |
| <b>Tekstür oluşumu</b>           | Gerçek et benzeri yapı eksikliği      | Scaffold ve mekanik stimülasyon      |              |
| <b>Tüketici kabulü</b>           | Yapaylık algısı                       | Şeffaf iletişim ve hibrit ürünler    |              |
| <b>Regülasyonel belirsizlik</b>  | Standartların oluşmaması              | tam Uluslararası geliştirme          | mevzuat      |

Kaynak: Stephens ve ark., (2018), Humbird (2021), Chriki ve Hocquette (2020) ve Ben-Arye ve

## 11. Sonuç ve Genel Değerlendirme

Kültürlenmiş et teknolojisi, geleneksel hayvansal üretim sistemlerine alternatif oluşturma potansiyeli taşıyan, çok disiplinli ve hızla gelişen bir biyoteknolojik üretim yaklaşımıdır. Bu sistem; hücre biyolojisi, doku mühendisliği, biyoproses teknolojisi, biyomalzeme bilimi, gıda mühendisliği ve regülasyon bilimlerinin kesişiminde yer almakta olup, yalnızca yeni bir gıda ürünü değil, aynı zamanda yeni bir üretim paradigması ortaya koymaktadır.

Bu bölümde değerlendirildiği üzere kültürlenmiş et üretimi, basit bir hücre çoğaltma süreci değildir. Hücre kaynağının seçimi, proliferasyon kapasitesinin korunması, kontrollü farklılaşmanın sağlanması, kültür ortamı optimizasyonu, büyüme faktörü kullanımı, biyoreaktör sistemlerinin tasarımı ve üç boyutlu doku organizasyonu gibi çok sayıda biyolojik ve mühendislik parametresinin entegre şekilde yönetilmesini gerektirmektedir. Özellikle doğal kas dokusunun kompleks yapısının laboratuvar ortamında yeniden oluşturulması, kültürlenmiş et teknolojisinin temel bilimsel zorluklarından biri olarak öne çıkmaktadır.

Kas hücrelerinin organize lif yapıları oluşturma, yağ dokusunun kontrollü şekilde entegre edilmesi, oksijen ve besin transferinin sağlanması ve gerçek et benzeri tekstürün geliştirilmesi, kültürlenmiş et sistemlerinde halen çözülmesi gereken temel problemler arasındadır. Bunun yanı sıra büyük ölçekli biyoreaktör sistemlerinde hücresel stabilitenin korunması, metabolik atık kontrolü, enerji verimliliği ve steril üretim koşullarının sürdürülebilir şekilde sağlanması da teknolojinin endüstriyel uygulanabilirliğini belirleyen kritik faktörlerdir.

Kültür ortamı bileşenleri ve büyüme faktörlerinin yüksek maliyeti, günümüzde kültürlenmiş etin ekonomik sürdürülebilirliği açısından en önemli sınırlamalardan birini oluşturmaktadır. Özellikle serum-free sistemlerin geliştirilmesi, düşük maliyetli rekombinant büyüme faktörlerinin üretilmesi ve optimize edilmiş biyoproses stratejilerinin oluşturulması, gelecekte sektörün gelişim hızını doğrudan belirleyecektir.

Kültürlenmiş etin çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli potansiyeller taşıdığı düşünülmekle birlikte, bu avantajların üretim sistemi, enerji kaynağı ve proses verimliliğine bağlı olarak değişebileceği unutulmamalıdır. Geleneksel hayvancılık sistemlerine kıyasla arazi ve su kullanımında teorik avantajlar söz konusu olsa da, yüksek enerji tüketimi ve kompleks biyoproses gereksinimleri çevresel değerlendirmelerin dikkatli yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Ayrıca kültürlenmiş etin sürdürülebilirliği, sadece son ürün düzeyinde değil, tüm üretim zinciri boyunca değerlendirilmelidir.

Hayvan refahı ve etik üretim yaklaşımı, kültürlenmiş et teknolojisinin en güçlü argümanlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte fetal bovine serum kullanımı, biyoteknolojik üretimin doğallığına ilişkin tartışmalar ve tüketici güveni gibi konular, teknolojinin toplumsal kabulü açısından kritik önem



taşımaktadır. Özellikle tüketicilerin kültürlenmiş eti nasıl algıladığı, bu ürünleri ne ölçüde “gerçek et” olarak kabul ettiği ve gıda güvenliği konusundaki yaklaşımları, teknolojinin ticari başarısını doğrudan etkileyecektir.

Regülasyon süreçleri de kültürlenmiş etin geleceğini şekillendiren temel alanlardan biridir. FDA, USDA, EFSA ve diğer regülasyon kurumlarının geliştireceği standartlar; hücre hattı güvenliği, kültür ortamı bileşenleri, scaffold sistemleri, kalite kontrol kriterleri ve etiketleme politikaları açısından belirleyici olacaktır. Özellikle uluslararası üretim standartlarının oluşturulması, sektörün küresel ölçekte gelişebilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Gelecekte kültürlenmiş et araştırmalarının; serum-free ortam sistemleri, düşük maliyetli büyüme faktörleri, gelişmiş scaffold teknolojileri, vaskülarizasyon stratejileri, yapay zeka destekli biyoproses optimizasyonu ve üç boyutlu biyobaskı sistemleri üzerine yoğunlaşması beklenmektedir. Bunun yanı sıra hibrit ürün sistemleri, fonksiyonel olarak modifiye edilmiş et ürünleri ve kişiselleştirilmiş beslenme yaklaşımları da kültürlenmiş et teknolojisinin yeni araştırma alanları arasında yer alacaktır.

Sonuç olarak kültürlenmiş et, yalnızca laboratuvar ortamında hücre çoğaltılmasıyla sınırlı bir teknoloji değil; biyolojik sistemlerin endüstriyel gıda üretimine yeniden uyarlanması hedefleyen kapsamlı bir biyoteknolojik dönüşüm alanıdır. Ancak bu teknolojinin gerçek anlamda başarılı olabilmesi için biyolojik uygulanabilirlik, ekonomik sürdürülebilirlik, çevresel denge, regülasyon uyumu ve toplumsal kabulün birlikte sağlanması gerekmektedir. Nitekim kültürlenmiş etin geleceği, disiplinler arası bilimsel ilerlemelerin yanı sıra toplumun bu yeni üretim modeline nasıl yaklaşacağı ile de doğrudan ilişkili olacaktır.

## KAYNAKLAR

- Allan, S. J., De Bank, P. A., Ellis, M. J. (2019). Bioprocess design considerations for cultured meat production with a focus on the expansion bioreactor. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 3, 44.
- Ben-Arye, T., & Levenberg, S. (2019). Tissue engineering for clean meat production. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 3, 46.
- Ben-Arye, T., Shandalov, Y., Ben-Shaul, S., Landau, S., Zagury, Y., Ianovici, I., ... Levenberg, S. (2020). Textured soy protein scaffolds enable the generation of three-dimensional bovine skeletal muscle tissue for cell-based meat. *Nature Food*, 1(4), 210–220.
- Bentzinger, C. F., Wang, Y. X., & Rudnicki, M. A. (2012). Building muscle: Molecular regulation of myogenesis. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 4(2), a008342.
- Bhat, Z. F., & Fayaz, H. (2011). Prospectus of cultured meat—Advancing meat alternatives. *Journal of Food Science and Technology*, 48(2), 125–140.
- Bhat, Z. F., Kumar, S., & Fayaz, H. (2015). In vitro meat production: Challenges and benefits over conventional meat production. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(2), 241–248.
- Bhat, Z. F., Morton, J. D., Mason, S. L., Bekhit, A. E. D., & Bhat, H. F. (2019). Technological, regulatory, and ethical aspects of cultured meat. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(4), 1192–1208.
- Bodiu, V., Moutsatsou, P., & Post, M. J. (2020). Microcarriers for upscaling cultured meat production. *Frontiers in Nutrition*, 7, 10.
- Boehler, R. M., Shin, S., Fast, A. G., Gower, R. M., & Shea, L. D. (2019). A PLGA nanofiber scaffold for engineering skeletal muscle tissue. *Biomaterials Science*, 7(4), 1411–1421.
- Bomkamp, C., Dargaville, T. R., & Vaquette, C. (2022). Scaffolds for cultivated meat on the basis of polymers and plant-derived materials. *Trends in Food Science & Technology*, 131, 81–94.
- Bryant, C., & Barnett, J. (2018). Consumer acceptance of cultured meat: A systematic review. *Meat Science*, 143, 8–17.
- Bryant, C., & Dillard, C. (2019). The impact of framing on acceptance of cultured meat. *Frontiers in Nutrition*, 6, 103.
- Choi, K. H., Yoon, J. W., Kim, M., Lee, H. J., Jeong, J., Ryu, M., ... Kim, J. (2023). Muscle tissue engineering strategies for cultured meat production. *Food Hydrocolloids*, 137, 108330.

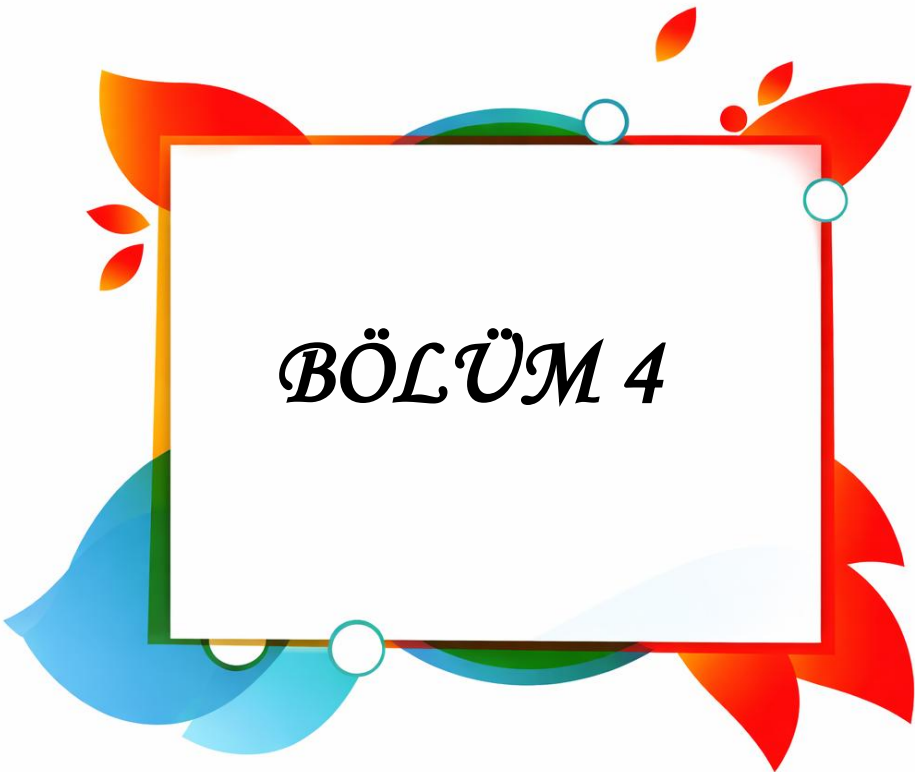
- Choudhury, D., Tseng, T. W., Swartz, E., & Kaplan, D. L. (2020). The role of edible scaffolds in cultured meat production. *Foods*, 9(12), 1866.
- Chriki, S., & Hocquette, J. F. (2020). The myth of cultured meat: A review. *Frontiers in Nutrition*, 7, 7.
- Food and Drug Administration (FDA). (2022). FDA completes first pre-market consultation for human food made using animal cell culture technology. U.S. Food and Drug Administration.
- Fraeye, I., Kratka, M., Vandenburgh, H., & Thorrez, L. (2020). Sensorial and nutritional aspects of cultured meat in comparison to traditional meat: Much to be inferred. *Frontiers in Nutrition*, 7, 35.
- Hocquette, J. F. (2016). Is in vitro meat the solution for the future? *Meat Science*, 120, 167–176.
- Humbird, D. (2021). Scale-up economics for cultured meat. *Biotechnology and Bioengineering*, 118(8), 3239–3250.
- Kadim, I. T., Mahgoub, O., Baqir, S., Faye, B., & Purchas, R. (2015). Cultured meat from muscle stem cells: A review of challenges and prospects. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(2), 222–233.
- Kai, D., Prabhakaran, M. P., Jin, G., & Ramakrishna, S. (2011). Guided orientation of cardiomyocytes on electrospun aligned nanofibers for cardiac tissue engineering. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 98B(2), 379–386.
- Kawecki, M., Włodarczyk, J., & Kowalczyk, D. (2024). Edible scaffold engineering and biomaterial strategies for cultured meat production: Current advances and future perspectives. *Annual Review of Food Science and Technology*, 15, 237–261. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-072023-034451>
- Khodabukus, A., Prabhu, N., Wang, J., & Bursac, N. (2019). Electrical stimulation increases hypertrophy and metabolic flux in tissue-engineered human skeletal muscle. *Biomaterials*, 198, 259–269.
- Kolkman, A. M., Post, M. J., Rutjens, M. A. M., van Essen, A. L. M., & Moutsatsou, P. (2020). Serum-free media for the growth of primary bovine myoblasts. *Cytotechnology*, 72(1), 111–120.
- Lynch, J., & Pierrehumbert, R. (2019). Climate impacts of cultured meat and beef cattle. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 3, 5.
- Mattick, C. S., Landis, A. E., Allenby, B. R., & Genovese, N. J. (2015). Anticipatory life cycle analysis of in vitro biomass cultivation for cultured meat production in the United States. *Environmental Science & Technology*, 49(19), 11941–11949.

- Mauro, A. (1961). Satellite cell of skeletal muscle fibers. *The Journal of Biophysical and Biochemical Cytology*, 9(2), 493–495.
- Moritz, M. S. M., Verbruggen, S. E. L., & Post, M. J. (2015). Alternatives for large-scale production of cultured beef: A review. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(2), 208–216.
- Ng, S., Kurisawa, M., & Yeo, D. C. (2020). 3D bioprinting of cultured meat products. *Trends in Biotechnology*, 38(6), 593–596.
- Ong, K. J., Johnston, J., Datar, I., Sewalt, V., Holmes, D., & Shatkin, J. A. (2021). Food safety considerations and research priorities for the cultured meat and seafood industry. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(6), 5421–5448.
- Ostrovidov, S., Hosseini, V., Ahadian, S., Fujie, T., Parthiban, S. P., Ramalingam, M., ... & Khademhosseini, A. (2014). Skeletal muscle tissue engineering: methods to form skeletal myotubes and their applications. *Tissue Engineering Part B: Reviews*, 20(5), 403–436.
- Post, M. J. (2012). Cultured meat from stem cells: Challenges and prospects. *Meat Science*, 92(3), 297–301.
- Post, M. J. (2014). An alternative animal protein source: Cultured beef. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1328(1), 29–33.
- Post, M. J., Levenberg, S., Kaplan, D. L., Genovese, N., Fu, J., Bryant, C. J., ... Moutsatsou, P. (2020). Scientific, sustainability and regulatory challenges of cultured meat. *Nature Food*, 1(7), 403–415.
- Reiss, J., Robertson, S., & Suzuki, M. (2021). Hybrid and whole-cell cultured meat: State of the industry and future prospects. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 34(2), 1–28. <https://doi.org/10.1007/s10806-021-09859-1>
- Rosen, E. D., & MacDougald, O. A. (2006). Adipocyte differentiation from the inside out. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 7(12), 885–896.
- Siegrist, M., Sütterlin, B., & Hartmann, C. (2018). Perceived naturalness and evoked disgust influence acceptance of cultured meat. *Meat Science*, 139, 213–219.
- Specht, E. A. (2019). An analysis of culture medium costs and production volumes for cultivated meat. *The Good Food Institute Report*, 1–17.
- Specht, E. A., Welch, D. R., Rees Clayton, E. M., & Lagally, C. D. (2018). Opportunities for applying biomedical production and manufacturing methods to the development of the clean meat industry. *Biochemical Engineering Journal*, 132, 161–168.
- Stephens, N., Di Silvio, L., Dunsford, I., Ellis, M., Glencross, A., & Sexton, A. (2018). Bringing cultured meat to market: Technical, socio-political, and regulatory

- challenges in cellular agriculture. *Trends in Food Science & Technology*, 78, 155–166.
- Stout, A. J., Mirliani, A. B., Soule-Albridge, E. L., Cohen, J. M., Kaplan, D. L., & Black, L. D. (2020). Simple and effective serum-free medium for sustained expansion of bovine satellite cells for cell cultured meat. *Communications Biology*, 3, 372.
- Stout, A. J., Rizk, R. S., Karp, J. M., & Kaplan, D. L. (2021). Engineering carotenoid production in cultured fat tissue. *NPJ Science of Food*, 5, 26.
- Takahashi, K., & Yamanaka, S. (2006). Induction of pluripotent stem cells from mouse embryonic and adult fibroblast cultures by defined factors. *Cell*, 126(4), 663–676.
- Tuomisto, H. L., & Teixeira de Mattos, M. J. (2011). Environmental impacts of cultured meat production. *Environmental Science & Technology*, 45(14), 6117–6123.
- Van der Valk, J., Bieback, K., Buta, C., Cochrane, B., Dirks, W. G., Fu, J., ... Gstraunthaler, G. (2018). Fetal bovine serum (FBS): Past - present - future. *ALTEX*, 35(1), 99–118.
- Wang, Y., Zhao, X., Liu, Z., & Chen, J. (2023). Recent advances in 3D scaffold engineering for cultured meat production. *Foods*, 12(13), 2614. <https://doi.org/10.3390/foods12132614>
- Yin, H., Price, F., & Rudnicki, M. A. (2013). Satellite cells and the muscle stem cell niche. *Physiological Reviews*, 93(1), 23–67.







## *BÖLÜM 4*



# Kaynaktan Bardağa: İçme Sularında Mikroplastiklerin Taşınımı, Dönüşümü ve Sağlık Üzerine Etkileri

*Orhan Dağlıoğlu<sup>1</sup> & Tuncay Gümüş<sup>2</sup>*

## Giriş

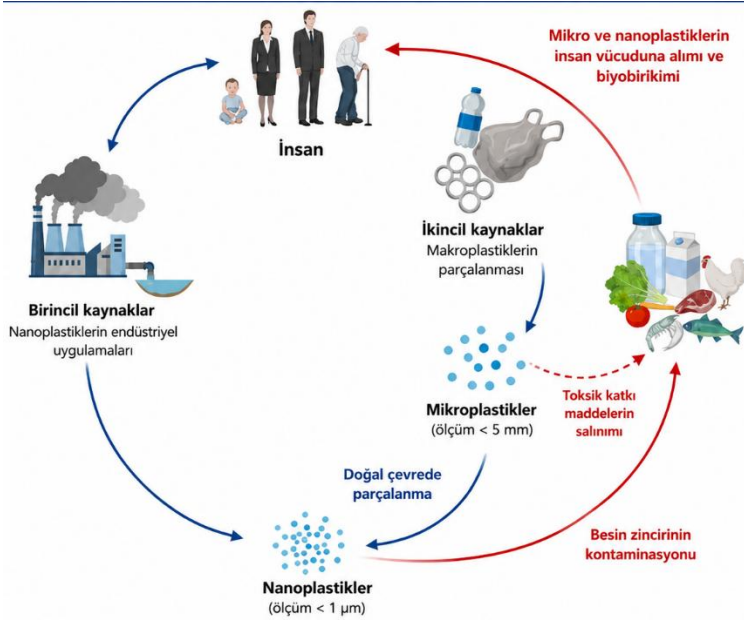
Plastikler, dayanıklılıkları, esneklikleri, düşük maliyetleri ve kolay şekillendirilebilmeleri nedeniyle ambalaj, tekstil, tarım, sağlık ve gıda endüstrisi başta olmak üzere çok geniş bir kullanım alanına sahip sentetik polimerlerdir. Son 70 yılda plastik üretiminde meydana gelen hızlı artış, diğer tüm kimyasal maddelerin üretimini geçerek küresel ölçekte plastiği önemli çevresel sorunlardan biri haline getirmiştir. Küresel plastik üretiminin 2021 yılında 391 milyon tona ulaştığı, mevcut üretim ve tüketim eğilimlerinin devam etmesi durumundan 2050 yılında yaklaşık 3 kat artarak 1,1 milyar tona çıkacağı öngörülmektedir. Buna paralel olarak dünya genelinde yaklaşık olarak 22 milyon ton plastik atığın her yıl ekosistemlere girdiği ve 2030 yılına kadar atık miktarının yıllık yaklaşık 30 milyon tona ulaşacağı tahmin edilmektedir. Her geçen yıl artan üretim ve kullanıma karşılık, bertaraf yöntemlerinin yetersizliği nedeniyle plastik kirliliği, doğal ekosistemler, insan sağlığı ve sürdürülebilirlik için ciddi bir tehdit haline gelmiştir. Özellikle son yıllarda okyanuslarda plastik çöplerinin tespit edilmesi, bilim insanlarının, uluslararası kuruluşların ve popüler medyanın dikkatini çekmektedir. Bu konudaki tehlikenin dünya gündemine gelmesi ve son yıllarda yapılan çok sayıda bilimsel araştırmaya rağmen doğada (okyanuslar, denizler, tüm su kaynakları, toprak, hava) atık halde bulunan plastik miktarı ile bunların ekolojik denge üzerindeki etkileri tam olarak bilinmemektedir (Hale vd., 2020; Rota vd., 2022; Soudavari vd., 2025; Rangari vd., 2026; Calikanzaros vd., 2026; Walker vd., 2026).

Doğaya atılan plastiklerin Ultraviyole (UV) ışıınımı, mekanik aşınma, oksidatif reaksiyonlar, biyolojik parçalanma ve sıcaklık değişimleri gibi fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçlerin etkisiyle parçalanması ve çeşitli faktörler sonucunda bozunması, mikro ve nanoplastikler (MNP'ler) gibi daha küçük partiküllere ayrışmalarına yol açmaktadır. Bu süreç sonunda oluşan mikroplastikler (MP) 1 µm-5 mm arasındaki, nanoplastikler (NP) ise 1 µm'den küçük boyutlardaki çeşitli petrol türevli polimerleri temsil etmektedir. Bu plastik partikülleri toplam plastik kirliliğinin %90'ından

<sup>1</sup> Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Tekirdağ, ORCID: 0000-0003-2859-8481

<sup>2</sup> Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Tekirdağ, ORCID:0000-0001-7635-5519

fazlasını oluşturmakta ve sucul ekosistemlerden atmosferik ortamlara kadar geniş bir yayılım göstermektedir. Sadece Avrupa’da yılda yaklaşık 75.000-300.000 ton MP’nin çevreye salındığı ve bununda içme suları, gıdalar ve havanın yaygın bir şekilde kirlenmesine yol açtığı bildirilmektedir. Su kaynaklarında ve gıda zincirinde MP’lerin varlığı yoğun bir şekilde çalışılmıştır. Ancak, boyutlarının çok küçük ve standart analiz yöntemlerinin sınırlı olması nedeniyle NP’ler yeterince anlaşılamamış, sağlık üzerindeki etkilerine ait veriler sınırlı düzeyde kalmıştır (Arı vd., 2025; Heo vd., 2025; Kochanek vd., 2025; Njema vd., 2026; Calikanzaros vd., 2026). Şekil 1’de MNP’lerin insanlara bulaşma kaynakları gösterilmiştir.



**Şekil 1.** MNP’lerin bulaşma kaynakları (Chatgpt’de hazırlanmıştır)

MP ve NP kirliliğinin çevre, canlı organizmalar ve insanlar üzerindeki zararlı etkilerini inceleyen çalışmaların sayısı giderek artmaktadır. MNP’lerle ilgili olarak son yıllarda yapılan araştırmalar, Arktik Okyanusundan Antarktika’ya kadar dünyanın en uzak ve izole bölgelerinde bile mikro ve nanoplastik kirliliğinin kapsamını ve büyüklüğünü ortaya koymaktadır. MNP kirliliği başlangıçta daha çok denizlerle ilgili bir sorun olarak düşünülüyor ve büyük ölçüde deniz canlılarını etkilediği zannediliyordu. Ancak, kirliliğin boyutu ortaya çıkmaya başladıkça MNP araştırmaları, tatlı su kaynakları, yeraltı suları, kar, buz, toprak, tortu (sediment), biyota ve atmosfer düzeyinde yoğun bir şekilde yapılmaya başlanmıştır (Huntington vd., 2020; Jones-Williams vd., 2025; Walker vd., 2026). Çevresel ortamlarda taşınabilirlik özellikleri, uzun süre bozunmadan kalabilmeleri ve biyobirikim potansiyelleri nedeniyle MNP’ler küresel ölçekte önemli çevresel kirleticiler olarak kabul edilmektedir.

Araştırma sonuçlarının ortaya koyduğu veriler sonrasında, MNP'ler halk sağlığı açısından endişe verici yeni kirleticiler olarak kabul edilmektedir. Deniz ürünleri, bal, sebzeler, meyveler, süt ve süt ürünleri, içecekler ve tuz gibi çok sayıda gıdada ve en önemlisi içme sularında (musluk suları ve şişelenmiş sular) yaygın şekilde tespit edilmiştir. İçme sularındaki MNP kirliliği son derece önemlidir. Günlük su tüketiminin insan yaşamı için vazgeçilmez olması nedeniyle içme suları, MNP maruziyetinin temel kaynaklarından biri olarak değerlendirilmektedir (Başaran vd., 2024; Wen vd., 2024; Grasso vd., 2025; Rawat vd., 2026; Junior ve Moreno-Arribas, 2026; Dalla Fontana vd, 2026). Özellikle bazı çalışmalarda şişelenmiş sularda, belediyelerin arıtma tesislerinde arıtılmış musluk sularına göre daha yüksek düzeyde MNP konsantrasyonu belirlenmiş ve şişelenmiş su tüketiminin musluk suyuna kıyasla vücutta daha yüksek MNP yüküne yol açabileceği ileri sürülmüştür (Calikanzaros vd., 2026). Bu nedenle, içme sularındaki MNP kontaminasyonu, küresel düzeyde son yılların en önemli çevre ve halk sağlığı sorunlarından birisi olarak kabul edilmektedir (Huang vd., 2022).

MNP'lerin polimerik bileşimleri yanında üretimlerinde kullanılan toksik kimyasal katkı maddeleri ve yüzeylerine yapışan zararlı mikroorganizmalar, insanların MNP'lere istem dışı maruz kalmasına ilişkin endişeleri daha da artırmaktadır (Al-Mansoori vd., 2025). MNP'lerin organizmalar tarafından alınmasının organlarda birikime, fiziksel hasara, büyüme ve üreme üzerinde olumsuz etkilere yol açabileceği ileri sürülmektedir. Özellikle MNP'lerin bağırsak ve akciğerlerdeki biyolojik bariyerleri aşabilme potansiyeline sahip olduğu, bağırsak epitel, akciğer dokusu ve hücrel membranlar üzerinden dolaşım sistemine girerek beyin, böbrekler ve üreme organları dahil olmak üzere dokulara ulaşabileceği bildirilmiştir. Bunun sonucu olarak insanların kanlarında, idrarlarında ve dışkılarında yüksek miktarda MNP varlığı belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar, MNP'lerin DNA hasarından iltihaplanmaya ve bağırsak mikrobiyotası dengesizliğine kadar değişen bir dizi olumsuz biyolojik tepkiye neden olabileceğini göstermektedir. Diğer taraftan, MNP'lerin yutulduktan sonra organizmalara ağır metalleri ve organik kirleticileri taşıyarak biyolojik birikime ve daha yüksek trofik seviyelere transferine neden olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, bireylerin MNP'ye maruz kalma ve sağlık etkilerine ilişkin kanıtlar son derece sınırlı olmakla birlikte (Shruti vd., 2021; Soudavari vd., 2025; Bhattacharya ve Rajaram, 2026; Calikanzaros vd., 2026). içme sularındaki MNP'lerin özellikle nanoplastik fraksiyonlarının karakterizasyonu, standart analiz yöntemlerinin eksikliği ve insan maruziyetinin nicel olarak değerlendirilmesine ilişkin veriler halen yetersizdir. Ayrıca, Türkiye'de içme sularındaki MNP kontaminasyonuna yönelik kapsamlı çalışmalar sınırlı sayıdadır.

Bu bölümde; içme sularındaki mikro ve nanoplastik kontaminasyonunun kaynakları, mikro ve nano plastiklerin (MNP) özellikleri, çevresel yayılımı ve çevreye olan etkileri, sulu ekosistemlerde oluşturdıkları kirlilik, ve insan sağlığı

açısından oluşturduğu potansiyel riskler güncel literatür verileri doğrultusunda kapsamlı olarak değerlendirilmiştir.

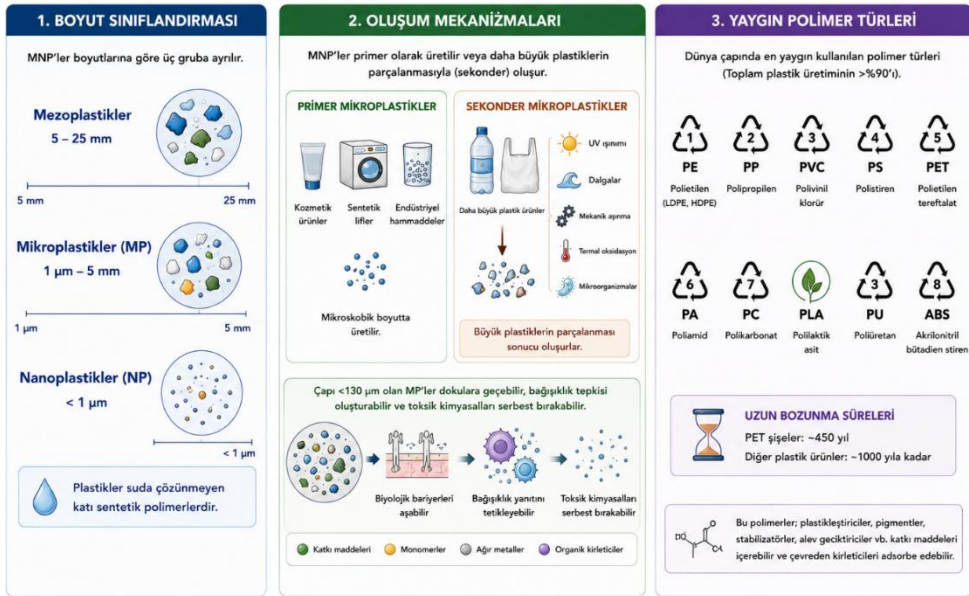
## 2. Mikro-Nano Plastikler (MNP) ve Özellikleri

Plastikler, suda çözünmeyen, yüksek molekül ağırlıklı sentetik polimerler olup kimyasal bileşimleri, fiziksel formları, boyutları, yapı ve şekilleri bakımından önemli farklılıklar göstermektedirler. Boyutlarına göre genel olarak mezo-, mikro- ve nanoplastik partikülleri olarak gruplandırılabilirler. Mezo- plastikler <25 mm- 5 mm, mikroplastikler (MP) 1 µm - 5 mm arasındaki ve nanoplastikler (NP) 1 µm'den küçük boyutlardaki suda çözünmeyen katı plastik partiküllerdir. MP'ler, büyük plastik materyallerin farklı fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçler sonucunda parçalanıp küçük plastik partiküllere ayrışmasıyla oluşan ürünlerdir. Oluşum mekanizmalarına bağlı olarak MP'ler, orijinleri bakımından primer ve sekonder MP'ler olmak üzere iki temel gruba ayrılmaktadır. İki MP grubu arasındaki en önemli farklılık çevreye karışma yollarıdır. Primer MP'ler üretildikleri son formlarında çevreye karışırken, sekonder MP'ler daha büyük plastiklerin aşınma veya yıpranması sonucu (güneş ışınları/UV, dalgalar, mekanik parçalanma, termal oksidasyon, mikroorganizmalar vd.) doğrudan çevrede daha küçük parçacıklara dönüşmesiyle oluşurlar (Tirkey ve Upadhyay, 2021; Rota vd., 2022; Pompermeyer vd., 2026). Çapı 130 µm'den küçük MP parçacıklar, insan dokularına geçme, lokalize bir bağışıklık tepkisini tetikleme ve bileşen monomerlerini, plastik üretiminde eklenen toksik kimyasalları ve çevreden emilen kirleticileri (ağır metaller ve DDT gibi kalıcı organik kirleticiler dahil) serbest bırakma potansiyeline sahiptir (Cox vd., 2019).

Çevrede yaygın olarak bulunan ve aynı zamanda toplam küresel plastik üretiminin %90'ından fazlasını oluşturan plastik türleri arasında polietilen (PE) (düşük yoğunluklu polietilen-LDPE ve yüksek yoğunluklu polietilen-HDPE), polipropilen (PP), polivinil klorid (PVC), polistiren (PS), polietilen tereftalat (PET), poliamid (PA), polikarbonat (PC), polilaktik asit (PLA), poliüretan (PU) ve akrilonitril bütadien stiren (ABS) yer almaktadır. Bu polimerlerin büyük çoğunluğu termoplastik özellik göstermekte olup özellikle dünya genelinde en fazla kullanılan PE, ikinci sırada PP ve daha sonra PET plastik türleridir. . Ayrıca PET şişelerin yaklaşık 450 yıl ve bazı plastik ürünlerin için 1000 yıla kadar bozunmadan çevrede kalabilmesi, plastik kirliliğinin kalıcılığını artıran en önemli dezavantajlarından biri olarak kabul edilmektedir (Andrady, 2017; Gambino vd., 2022; Kochanek vd., 2025).

MP'lerin büyüklükleri farklılık gösterdiği gibi şekil ve renkleri de farklılık gösterir. Lif, parçacık, boncuk, pelet ve köpük gibi değişik şekillerde, renk olarak da siyah, mavi, gri, beyaz, şeffaf, kırmızı ve yeşil gibi farklı renklerde bulunabilmektedir. Sarı, kahverengi, pembe ve mor gibi renkler ise daha az görülür. Sudaki organizmalarla ilgili çalışmalarda MP'lerin rengi önem taşır. Bazı organizmalar renk tercihlerine göre MP'leri yutarlar. Örneğin; şeffaf ve beyaz

MP'ler deniz canlıları tarafından en fazla yutulanlardır. Diğer taraftan renk, MP'lerin kirleticilerle ne kadar kirlendiğini de göstermektedir. Sarı ve siyah MP'ler kalıcı organik kirleticilerle en çok kirlenenlerdir. MP'lerin rengi üretildikleri polimerin belirlenmesinde de kullanılmaktadır. Temiz ve şeffaf MP'ler genellikle PP'den üretilirken, beyaz ve mat renkli MP'ler çoğunlukla PE ve LDPE'den üretilmektedir. MP'lerin aşınma derecesi yüzeylerindeki solma ve aşınmaya göre de tahmin edilebilmektedir. Polimerin tipi, şekli, rengi ve büyüklüğü MP'lerin teşhisinde önemli veri sağlar (Cverenkárová vd., 2021). MP'lerin şekil ve renk özellikleri; polimer tipinin belirlenmesi, çevresel bozunma düzeyinin değerlendirilmesi ve kirlenme yükünün tahmin edilmesi açısından önemli göstergeler olarak kabul edilmektedir. Şekil 2'de Mikro-Nano Plastiklerini boyutları, oluşum mekanizmaları ve yaygın polimer türleri verilmiştir.



**Şekil 2.** Mikro-Nano Plastiklerini boyutları, oluşum mekanizmaları ve yaygın polimer türleri (Chatgpt'de hazırlanmıştır)

Plastikler; eritme, ekstrüzyon ve peletleme gibi farklı fiziksel işlemler ile plastikleştiriciler, renklendiriciler, kopolimerler ve diğer bileşiklerin karıştırıldığı kimyasal işlemler yoluyla elde edilen, kimyasal olarak çok çeşitli polimer bazlı bir malzeme grubudur (Hale vd., 2020; Rota vd., 2022; Soudavari vd., 2025). Bu nedenle, MP'ler ve dolayısı ile parçalanma ürünleri olan NP'ler katkı maddeleri, reaksiyona girmemiş monomerler, katalizör veya türevlerinin kalıntıları, suya sızabilen veya çevreden toksik kimyasalları emebilen pigmentler, yağlayıcılar, koyulaştırıcılar, antistatik maddeler, buğulanmayı/bulanıklığı önleyici maddeler, plastikleştiriciler ve alev geciktiriciler gibi çok sayıda kimyasal katkı maddesini içerebilir. Ayrıca çevrede bulunan ağır metaller, organik toksinler ve patojen

mikroorganizmalar da bu partiküllerin yüzeyine adsorbe olabilmektedir. Bu durum insan sağlığı ve diğer tüm canlılar için yalnızca fiziksel değil, aynı zamanda kimyasal, biyolojik ve toksikolojik bir risk faktörü olarak da değerlendirilmesine neden olmaktadır (Dalla Fontana vd, 2026).

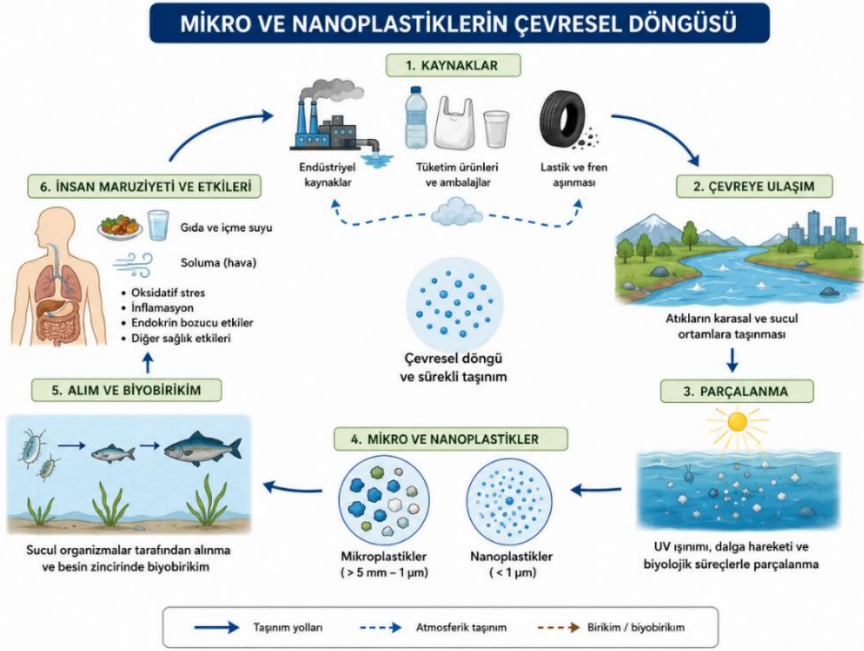
MP'ler zamanla parçalanarak NP'lere dönüşürler. NP'ler, genellikle 1 µm'den küçük olarak tanımlanan plastik partiküllerdir. Ancak bazı sınıflandırmalar, bu aralığı standart nanomalzeme tanımlarıyla uyumlu hale getirmek için 1 ile 100 nm (nanometre) arasına daraltmaktadır. NP'ler, çok küçük boyutları nedeniyle biyolojik bariyerleri aşabilmekte, hücre içerisine girebilmekte ve hücresel bileşenlerle doğrudan etkileşime girebilmektedir. Bu özellikleri nedeniyle toksikolojik açıdan MP'lere kıyasla daha yüksek risk oluşturdıkları düşünülmektedir. NP'ler iki yolla oluşabilir: ya endüstriyel kullanım için kasıtlı olarak tasarlanırlar ya da çevredeki plastik atıkların parçalanmasıyla doğal olarak oluşurlar. Nitekim, küresel şekilli MP'lerin parçalanmasının yaklaşık 1014 kat daha fazla sayıda NP partikülünün oluşumuna yol açtığı hesaplanmıştır.

Mikroplastiklerin analizinde mikro-Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (µ-FTIR) ve Raman spektroskopisi yaygın olarak kullanılmasına rağmen, NP'lerin çok küçük boyutları bu yöntemlerin çözünürlük sınırlarının altında kalabilmektedir. Bu nedenle nanoplastiklerin güvenilir şekilde belirlenebilmesi için nanopartikül izleme analizi (NTA), piroliz-gaz kromatografisi/kütle spektrometrisi (Py-GC/MS) ve gelişmiş elektron mikroskobu teknikleri gibi ileri analiz yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bununla birlikte, polimer türlerinin, partikül şekillerinin ve yüzey özelliklerinin çeşitlilik göstermesi MNP'lerin standart ve kapsamlı analizini halen önemli ölçüde zorlaştırmaktadır (Van Cauwenberghe ve Janssen, 2014; Lee vd., 2019; Hale vd., 2020; Turkey and Upadhyay, 2021; Molina ve Benedé, 2022; Arı vd., 2025; Manono vd., 2026; Demarquoy, 2026). MNP'ler, yukarıda da belirtildiği üzere, üretim süreçlerinde istenilen fiziksel ve kimyasal özelliklerin kazandırılması amacıyla ilave edilen ftalatlar, bisfenol A, stabilizatörler, pigmentler ve alev geciktiriciler gibi çok çeşitli katkı maddelerini yapılarında bulundurabilmektedir. Bunun yanı sıra MNP'ler yüksek yüzey alanları ve hidrofobik özellikleri nedeniyle ağır metaller, organik toksinler ve patojenler de dahil olmak üzere dış çevresel kirleticileri de yüzeylerine emerler. Bu durum, patojenleri ve tehlikeli kimyasalları taşıyabilmeleri nedeniyle hem fiziksel hem de kimyasal kontaminasyon riski oluştururken, kontamine olmuş MNP'lerin daha sonra yutulması veya solunması toksikolojik etkilere yol açabilir. Diğer taraftan, polimer türlerinin, boyutlarının, şekillerinin ve yüzey özelliklerinin çok çeşitli olması, MNP'lerin çevresel davranışlarının ve toksikolojik etkilerinin değerlendirilmesini önemli ölçüde zorlaştırmaktadır (Manono vd., 2026).

### **3. Mikro ve Nano Plastiklerin (MNP) Çevreye Etkileri**

Plastikler; hafif olmaları, yüksek esneklikleri, ısı ve elektrik yalıtım özellikleri, kimyasal dirençleri, dayanıklılıkları ve düşük maliyetleri nedeniyle gıda, kimya,

sağlık, ambalaj ve kozmetik dahil olmak üzere çok sayıda endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılan uzun zincirli polimerlerden oluşan malzemelerdir. Bununla birlikte, farklı polimer türlerden ve çoğunlukla kompozit malzemelerden oluştuğu için geri dönüşüm süreçleri de zordur. Uygun olmayan bir şekilde bertaraf edilmeleri nedeniyle her yıl büyük miktarda plastik atık çevreye karışmakta ve bu durum doğal kaynakların kalitesi ve ekosistemlerin sağlığı üzerindeki etkileri konusunda birçok endişeye yol açmaktadır (Gambino vd., 2022; Huang vd., 2022). Bugüne kadar üretilen plastiklerin az bir kısmı geri dönüştürülmüş veya yakılmış, geri kalanı ise çöpe atılmıştır. Yapılan tahminlere göre, dünya genelinde 1950 ve 2015 yılları arasında yaklaşık 6,3 milyar ton plastik atık oluşmuş ve söz konusu atıkların %79'u ya toprağa gömülmüş ya da çevreye atılmıştır. Plastik atıkların sadece %9'u geri dönüştürülmüş, %12'si yakılmış, kalan %79'u ise doğal çevrede (denizler ve karalar) birikmiştir. Çevreye karışan atık plastiklerin ise önemli bir kısmı okyanuslar, denizler, akarsular, göller gibi su kaynakları ile sanayi ve yerleşimin olduğu karasal alanlarda toplanmıştır. Ayrıca, okyanuslara ve denizlere her yıl yaklaşık olarak 8 milyon ton plastik atığın karıştığı tahmin edilmektedir. Bu nedenle sulardaki MNP kirliliği, küresel düzeyde son yılların en önemli çevre ve halk sağlığı sorunlarından birisi haline gelmiştir (Cverenkárová vd., 2021; Rota vd., 2022; Chandra ve Walsh, 2024). Plastikler çevreye atıldıktan sonra fiziksel, kimyasal ve biyolojik yollarla aşınmaya uğrayarak mikro ve nano boyutlu küçük partiküllere (MNP'lere) parçalanırlar. Oluşan MNP'lerin, plastik döngüsü yoluyla denizler, karalar ve atmosfer arasında geçiş yaptığı bilinmektedir. Bu durum MNP'lerin Arktik, Antarktika, Tibet Platosu, Avrupa Alp Bölgeleri, Amerika Kıtasındaki koruma alanları gibi insan etkisinden etkisinin sınırlı olduğu uzak coğrafyalarda dahi tespit edilmesine neden olmaktadır. MNP'ler denizlerde yaygın kirliliğe neden olurken karalarda ekosistemlere zarar verirler. Özellikle düşük yoğunlukları ve küçük boyutları sayesinde atmosferik taşınım ile uzun mesafelere yayılabilmekte ve farklı ekosistemlerde birikim gösterebilmektedirler (Aves vd., 2022). Son yapılan araştırmalar, özellikle kara ve hava taşıtlarında lastik ve fren aşınması sonucu ortaya çıkan MNP'lerin atmosferik emisyonlara ek bir kaynak oluşturduğunu göstermektedir (Kochanek vd., 2025). Şekil 3'de MNP'lerin çevresel döngüsü simule edilmiştir.



**Şekil 3.** MNP’lerin Çevresel Döngüsü (Chatgpt’de hazırlanmıştır)

Plastik üretim süreçlerinde istenilen fiziksel ve kimyasal özelliklerin kazandırılması amacıyla üretimleri sırasında ilave edilen katkı maddelerinin (stabilizörler, plastikleştiriciler, antioksidanlar, antimikrobiyaller, renk pigmentleri, alev geciktiriciler, ışık koruyucular, fiziksel değiştiriciler, dolgu maddeleri vd.) tümü hem serbest moleküller/parçacıklar/lifler halinde hem de polimer matrisine bağlı olarak bulunabilir ve çeşitli etkilerle MNP’lerden serbest hale geçerek bulundukları ortamı kirletebilirler. Özellikle Bisfenol A (BPA), ftalatlar ve bazı antioksidanların potansiyel endokrin bozucu etkilere sahip olduğu bildirilmektedir. Bu durum, özellikle gıda ambalaj materyallerinde kullanılan plastikler açısından önemli bir toksikolojik risk oluşturmaktadır. (Cverenkárová vd., 2021; Chiavarini vd., 2026).

Plastiklerin üretimleri sırasında kullanılan katkı maddelerinin haricinde, yapılan araştırmalar MNP’lerin çeşitli toksik kimyasalları da deniz ekosistemine yaymada taşıyıcı rol oynadığını ortaya koymuştur. Poliaromatik hidrokarbonlar, DDT, organoklorlu bileşikler, poliklorlu bifeniller (PCB), ağır metaller (kurşun, arsenik, kadmiyum, bakır, krom) ve antibiyotikler gibi toksik kimyasallar MNP’lere kontamine olabilmektedir. Toksik kimyasallarla kontamine olmuş MNP’ler, deniz canlıları tarafından yutulduğunda gıda zincirine girerek potansiyel bir tehlike oluştururlar (Cverenkárová vd., 2021).

Plastik malzemelerin yaygın kullanımı, küresel plastik üretiminde dramatik bir artışa yol açarak her yıl yaklaşık 400 milyon metrik ton plastik atığın ortaya



çıkmasına neden olmaktadır. Söz konusu bu atığın büyük bir kısmı atık yönetim sistemlerinden kaçarak karasal, tatlı su ve deniz ekosistemlerini kirletmektedir. Plastik atık parçaları, fiziksel aşınma, ultraviyole kaynaklı foto degradasyon, termal oksidasyon ve mikrobiyal biyodegradasyon yoluyla MP'lere ve MP'ler de 1000 nanometreden daha küçük NP partiküllere parçalanır. NP'ler, nano ölçekli boyutları nedeniyle hücre zarları, dokular ve kan-beyin bariyeri gibi biyolojik bariyerleri MP'lere göre daha kolay geçerek su organizmaları ve doğal yaşam için potansiyel bir risk oluşturmaktadır. Yapılan çalışmalar, NP maruziyetinin, planktonlardan balıklara kadar çeşitli türlerde oksidatif stres, inflamasyon ve genotoksisite ile bağlantılı olduğunu ve biyolojik birikim ile insan gıda zincirine giriş konusunda endişeleri artırdığını göstermektedir. Ayrıca NP'ler besin döngülerini değiştirerek ve ağır metaller ve organik kirleticiler gibi kirleticiler için taşıyıcı görevi görerek ekosistemleri bozmaktadır. Su sistemlerinde NP'lerin parçalanması, taşınımı ve ekolojik etkileri, kararlı kolloidler olarak davranmalarına, NP olarak kümelenme veya tortu olarak çökme eğilimlerine bağlıdır. Nano boyutları ve yüzey özellikleri nedeniyle kararlı NP'ler su içerisinde kalır ve bu durum balık gibi sucul organizmalar tarafından yutulmalarını kolaylaştırarak biyo birikime yol açabilir. Küçük, kümelenmemiş NP'ler ise difüzyon, endositoz veya membran bozulması yoluyla hücrelere girebilir. MP'ler ise balık solungaçları tarafından emilebilir, balık yumurtası veya deniz yosunu gibi av maddelerine yapışabilir veya doğrudan yutulabilir. MP'lere uzun süreli maruz kalma, balık bağırsaklarında iltihaplanmaya, bağırsak mikrobiyotasının bozulmasına ve metabolik bozukluklara ve hastalıklara neden olabilir. Boyutları 5 µm'den küçük MP'ler bağırsak hücrelerini geçebilir, kan dolaşımına girebilir ve dokulara göç edebilir (Pokhrel vd., 2026).

Birçok ülkede plastik atıkların önemli bir kısmı geri dönüştürülmek veya yakılmak yerine olduğu gibi çevreye atılmaktadır. Çevreye atılan plastik atıklar, karasal kaynaklarda, tarım arazilerinde, durgun sularda ve atıksu deşarjlarında birikerek buralardan nehirlerle karışmaktadır. MNP'ler son derece hafif olmaları nedeniyle rüzgar, yağışlar, yüzey akışı, sızma ve nehirler vasıtasıyla karadan su ekosistemlerine taşınmaktadır. Karasal kaynaklardan gelen plastik atıkların yaklaşık %70-80'inin (1,15-2,41 milyon ton) nehirler tarafından taşındığı ve nihayetinde okyanuslara ulaştığı tahmin edilmektedir. En yoğun karışım ise küresel toplamın yaklaşık %67'sini oluşturan, atık arıtma sistemlerinin yetersiz olduğu Asya ülkelerinin nehirlerinden gelmektedir. Dalgaların ve rüzgarların etkisiyle zamanla bu plastik atıklar parçalanarak MP'lere ve NP'lere dönüşmektedir. MNP'ler çok sayıda organik/inorganik kontaminantın ve patojenlerin içme sularına taşınmasına da aracılık etmektedir (Akarsu vd., 2017; Gambino vd., 2022; Singh, 2022).

Karasal ortamlar yanında MNP partiküllerin büyük çoğunluğu okyanuslar, denizler, nehirler, dereler, göller, göletler ve yer altı suları gibi su bulunan ortamlarda yoğunlaşmıştır. İnsan metabolizmasına hava, yiyecekler ve içme suyu yoluyla girerek sağlık üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir (Pham, 2026).

#### 4. Okyanuslarda/Denizlerde Mikro ve Nano Plastik (MNP) Kontaminasyonu

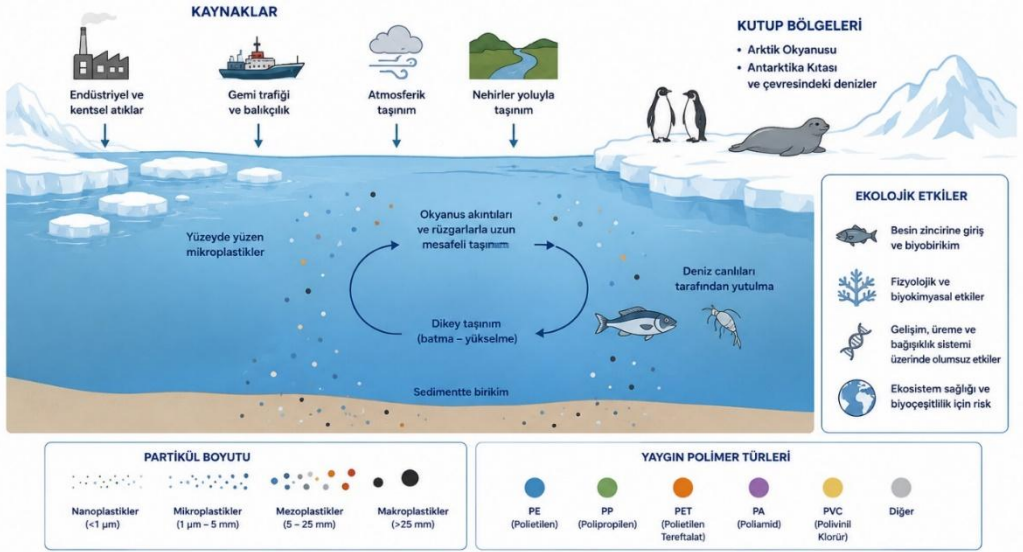
Atlas Okyanusunda yer alan Batı Sargasso Denizi'nde, 0,25-0,5 cm çapında ve pelet formunda plastik partiküllerin yaygın olarak bulunduğu (3500 adet/km<sup>2</sup>) 1972 yılında bildirilmesiyle denizlerde MP kirliliği küresel ölçekte dikkat çekmeye başlamıştır (Carpenter and Smith, 1972). Daha sonra yapılan araştırmalarda, en uzak kutup bölgeleri de dahil olmak üzere dünyanın bütün okyanus ve denizlerinin MP kontaminasyonuna maruz kaldığı ortaya konmuştur. Okyanuslardaki plastik kirliliği, uzun mesafelere taşınabilmeleri, yaygın dağılımları, çevrede yüksek kalıcılık göstermesi ve daha da önemlisi deniz canlıları için oluşturdukları potansiyel tehdit nedeniyle küresel düzeyde bir sorun haline gelmiştir. Arktik (Kuzey Kutbu) ve Antarktika (Güney Kutbu), Dünyanın zıt kutuplarında yer alan, biri okyanus diğeri kıta olan donmuş iki önemli kutup ekosistemidir. Arktik, karalarla çevrili bir okyanus yapısına sahipken, Antarktika okyanuslarla çevrili bir kıta niteliğindedir. Antarktika çok daha soğuk, daha izole ve yoğun buz örtüsüyle kaplı bir yapı sergilerken, Arktik bölgesi yerli halklara ve kutup ayıları gibi çeşitli canlı türlerine yaşam alanı sağlamaktadır. Bununla birlikte, Arktik Okyanusu gibi uzak kutup okyanuslarında MP'lerin saptanması diğer taraftan, Antarktika'da yeni yağan kar örneklerinde MP varlığının tespit edilmesi, bunların ne kadar geniş bir alana yayıldığını göstermektedir. Arktik Okyanus'ta olduğu gibi, Dünyanın en güneyinde yer alan Antarktika Kıtası'da, coğrafi izolasyonuna rağmen insan faaliyetlerinden kaynaklanan kirleticilere maruz kalmakta olup, son derece sınırlı yerel kirlilik kaynaklarına rağmen yüksek düzeyde dış kaynaklı kirleticiler taşınımına uğraması nedeniyle biyosferde kirleticilerin yayılım mekanizmalarının anlaşılmasında doğal bir laboratuvar niteliği taşımaktadır (Kanhai vd., 2018; Chandra ve Walsh, 2024; Pellegrino vd., 2025; Jones-Williams., vd., 2025; Rangari vd., 2026).

Deniz kirliliğinin önemli göstergelerinden biri olan plastikler, yüzey sularından derin deniz sedimentlerine kadar dünyanın dört bir yanında çeşitli miktarlarda ve boyutlarda bulunmaktadır. Kutup suları, kendine özgü ve oldukça verimli deniz besin ağlarını ve ekosistemlerini desteklerken, deniz kirliliğine karşı da savunmasız kalabilmektedir. Arktik'te deniz buzullarının yayılım alanı azalırken, okyanus taşınımı, giderek artan gemi trafiği ve balıkçılık faaliyetleri bölgedeki deniz kirliliğini de beraberinde getirmektedir. Ayrıca, hakim okyanus akıntıları, rüzgar akıntıları ve göçmen canlı türleri de kirleticilerin Arktik'e ulaşmasında önemli rol oynamaktadır. Arktik bölgesi, planktonik topluluklardan deniz memelilerine kadar önemli ve çeşitli bir ekosisteme ev sahipliği yapmaktadır. Norveç'in Svalbard adasının güney ve güneybatısındaki Arktik sularında yapılan ilk araştırmada, yüzey suyu (16 cm derinlik) örneklerinde ortalama 0,34 partikül/m<sup>3</sup> ve yüzey altı su (6 m derinlik) örneklerinde ortalama 2,68 partikül/m<sup>3</sup> düzeyinde MP varlığı tespit edilmiştir. MP partikül büyüklükleri 0,25 ile 7,71 mm arasında değişmiş, en yaygın partikül rengi ise siyah ve mavi olmuştur. FT-IR (Fourier Transform Infrared Spektroskopisi) analizleri sonucunda; polyester (%15), poliamid (%15), polietilen (%5), akrilik (%10), polivinil klorid (%5), selüloz (%30) ve orijini bilinmeyen

partiküller (%20) tespit edilmiştir. Partiküllerin özellikleri dikkate alındığında, bunların hakim akıntılar tarafından büyük mesafeler boyunca taşınan veya yerel gemi faaliyetlerinden kaynaklanan daha büyük plastik parçaların parçalanmasından ya da kıyı bölgelerinden gelen kanalizasyon ve atık su yoluyla girişten kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Söz konusu bölgede, eş zamanlı olarak gözlemlenen yüksek zooplankton bolluğu, deniz biyotasının MP'lerle karşılaşma olasılığının yüksek olduğuna ve trofik etkileşim potansiyelinin bulunduğuna işaret etmektedir (Lusher vd., 2015).

MP'ler küçük boyutları nedeniyle çok çeşitli deniz organizmaları tarafından kolaylıkla tüketilebilmektedir. MP'lerin deniz organizmaları üzerindeki etkisi, söz konusu partiküllerin sudaki konumuna bağlıdır. Genel olarak yüksek yoğunluklu partiküller dibe çöker ve tortuda birikirken, düşük yoğunluklu partiküller deniz yüzeyinde yüzer. Ancak biyolojik kirlenme, akıntı ve tatlı su girişi dikey karışmaya neden olabilir (Van Cauwenberghe ve Janssen, 2014). Arktik Orta Havzasında yapılan ilk araştırmada (Kanhai vd., 2018); okyanus yüzeyinin 8 m ile 4369 m arasındaki derinliklerinde MP varlığı belirlenmiştir. MP yoğunluğu en yüksek düzeyde Arktik Orta Havzası'nın çevresine yakın yerlerde tespit edilmiş ve ağırlıklı olarak polyeater (PES) bulunmuştur. Yüzey altı suyunun 8,5 derinliğinde ortalama  $0,97 \pm 1,20$  partikül/m<sup>3</sup> tespit edilmiştir. Bulunan ortalama partikül değeri, başka araştırmalarda Kuzeydoğu Pasifik Okyanusu ( $279 \pm 178$  partikül/m<sup>3</sup>) ve Atlantik Okyanusu ( $1,15 \pm 1,45$  partikül/m<sup>3</sup>) için tespit edilen ortalama partikül değerlerinden daha düşüktür. Söz konusu veriler, MP'lerin Orta Arktik Okyanusuna girdiğine ve yüzey sularından dikey olarak taşındığına işaret etmektedir. Ancak, dikey taşınmanın mekanizması henüz tam olarak açıklığa kavuşmamıştır. Şekil 4'de kutup ekosisteminde MNP Kirliliği chatgpt ile simule edilmiştir.

## Kutup Ekosistemlerinde Mikro ve Nanoplastik Kirliliği: Kaynaklar, Taşınım Mekanizmaları ve Ekolojik Etkiler



**Şekil 4.** Kutup Ekosistemlerinde MNP Kirliliği (Chatgpt’de hazırlanmıştır)

Arktik Okyanusu, Bering Boğazı ile Kuzey Pasifik Okyanusu’na ve Atlantik Okyanusu’na bağlıdır. Mu vd., (2019); Arktik Okyanusunun Pasifik bölümünde yer alan Kuzey Pasifik, Bering Denizi ve Chukchi Denizinin (Arktik Okyanusuna ait bir deniz) yüzey sularında yaptıkları araştırmada 0,018-0,31 partikül/m<sup>3</sup> arasında (ortalama 0,13±0,11 partikül/m<sup>3</sup>) MP tespit etmişlerdir. En yüksek MP düzeyi Chukchi Denizinde belirlenmiştir. Tespit edilen MP’lerin yarıdan fazlası 1,0 mm’den küçük, yaklaşık %25’i de 1,0-3,0 mm arasındaki orta büyüklükte MP’lerdir. En fazla belirlenen MP türü PET, en yaygın plastik şekli ise lif şeklindeki partiküller olmuştur. MP’lerin büyüklüğü, zararlı etkileri açısından da kritik bir faktördür. Küçük boyutlu MP’ler büyük olanlara göre zooplanktonlar gibi organizmalar tarafından çok daha kolay yutularak ekosisteme zarar verirler. Beslenmesi büyük oranda zooplanktonlara dayalı olan deniz canlıları da, MP’lerin Arktik sulara kadar taşınmasına aracılık ederler. Arktik bölgede yapılan çalışmalar yüzey sularında, yüzey altı sularında, deniz tabanında, kuşlarda, planktonlarda, balıklarda ve diğer deniz canlılarında MP varlığını ortaya koymuştur. İklim değişikliği ile birlikte MP’lerin ve kalıcı organik kirleticilerin taşınması, su dolaşımındaki ve buz örtüsündeki değişikliklere bağlı olarak farklılık göstermektedir. Nitekim, deniz buzunda donmuş halde bulunan MP’lerin buzlar eridikçe tekrar sulara karıştığı belirlenmiştir (Huntington vd., 2020).

Finlandiya’nın Arktik sularında yapılan araştırmada, tatlı su ve deniz suyu örneklerinde ortalama boyutları 126±121 µm olan ve sayıları 45 – 423 partikül /m<sup>3</sup>

arasında değişen MP varlığı tespit edilmiş, en yaygın polimer türleri ise PE, PP ve PET olmuştur. Doğal özelliklerini çok büyük oranda koruyan Arktik bölgedeki tatlı su ve deniz sularında MP kontaminasyonunun tespit edilmesi bu konudaki tehlikenin boyutunu da göstermektedir (Soininen vd., 2024). Kanada'nın Hudson Körfezi ve çevresindeki Doğu Kanada Arktik Bölgesinden alınan yüzey suları ve zooplankton örneklerinin %90'ında ve deniz dibi sedimentlerinin %85'inde MP veya insan kaynaklı diğer partiküller tespit edilmiştir. Söz konusu partiküllerin düzeyleri yüzey sularında ortalama  $0,22 \pm 0,23$  partikül/L, zooplanktonlarda  $3,51 \pm 4,00$  partikül/g ve sedimentlerde  $1,94 \pm 4,12$  partikül/g düzeyinde olmuştur. Arktik bölgede tespit edilen söz konusu kontaminasyonun, bölge yakınlarında yaşayan insan topluluklarından kaynaklanmadığı, okyanus ve atmosferik akıntılar yoluyla uzun mesafeli taşınmadan ileri geldiği düşünülmektedir (Huntington vd., 2020).

Antarktika, küresel iklimin çok önemli bir parçasıdır ve Dünyanın son büyük vahşi doğası olarak kabul edilmektedir. Gezegenin başlıca tatlı su rezervini oluşturur. Çevresel akıntısı tarafından izole edilen bu kıta, yeryüzündeki en soğuk, en kurak, en yüksek ve en ücra kıtasıdır. Donmuş kıta, 1961'den beri yürürlükte olan Antarktika Antlaşma Sistemi kapsamında korumaya alınmıştır. Antarktika'daki insan varlığı sadece bilimsel araştırma, balıkçılık, turizm ve lojistik desteği ile sınırlıdır. Talep edilen her faaliyet çevresel etki değerlendirilmesine tabi tutulur. Alınan tüm çevresel koruma önlemlerine rağmen Antarktika insan kaynaklı etkilere maruz kalmaktadır. Uzun mesafeli atmosferik taşınımın, MP'lerin yerleşim alanlarından uzak bölgelere veya okyanuslardan Antarktika'da dahil olmak üzere uzak bölgelere taşınmasında en etkili potansiyel yol olduğu düşünülmektedir. Kutup bölgeleri, atmosfer ve okyanus akıntıları yoluyla gelen kirleticiler için bir depo olarak kabul edilmektedir. Küresel ısınma, biriken bu kirleticilerin donmuş topraktan veya deniz buzunun erimesiyle yeniden ortaya çıkmasına yol açmaktadır. Antarktika'daki plastik kirliliği besin zincirini de etkilemektedir. NP'ler Antarktika krilinin gelişimini engellerken, sindirim sistemi yoluyla kuşlarda da olumsuz etkilere yol açmaktadır (Lozoya, vd., 2024; Jones-Williams vd., 2025). Antarktika'da yapılan başka bir çalışmada (Jones-Williams, K., vd., 2025), 2019 yılının Aralık ayında üç farklı lokasyondan alınan kar örneklerinin tamamında 73-3099 partikül/L arasında değişen düzeylerde (ortalama  $817 \pm 310$  partikül/L) MP varlığı belirlenmiştir. MP'lerin boyutları 11-497  $\mu\text{m}$  arasında değişmiş (%95'i 50  $\mu\text{m}$ 'den küçük), %79'unun parçacık, %21'inin de lif şeklinde olduğu tespit edilmiştir. Alınan her bir örnekte 2 ile 10 farklı polimer türü saptanmış olup en fazla bulunan plastik türleri PA (%55), PET (%12,3), PE (%10,9), sentetik kauçuk (%10,3), akrilatlar (%4,6), polipropilen (%3,1), kimyasal olarak modifiye edilmiş selüloz (CMC) (%2,2), PVC (%0,4), PS (%0,1) ve etilen vinil asetat (%0,1) olduğu bildirilmiştir. Aves vd. (2022) yapmış oldukları başka bir çalışmada ise, Antarktika'da en uzak noktaları da içeren 19 farklı lokasyondan alınan kar örneklerinin tamamında MP saptanmış (ortalama 29 partikül/L) ve toplam olarak 13 farklı polimer türü belirlenmiştir. En fazla bulunan plastik türü PET (örneklerin %79'u), plastik rengi

mavi (%55) ve pembe (%23), en yaygın plastik şekilleri ise lif (%61), parçacık ve film olmuştur. MP'lerin boyutları 50-3510  $\mu\text{m}$  arasında değişmiş (%81'i <1000  $\mu\text{m}$ ) ve ortalama büyüklük 606  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Tespit edilen bu kirliliğin okyanus akıntılarıyla uzun mesafeli taşınmalardan ve lokal kaynaklardan oluştuğu ileri sürülmüştür. Diğer taraftan araştırma istasyonlarında görev yapan personelin kullandığı ekipman ve malzemelerin de söz konusu MP kirliliğine az da olsa etki ettiği düşünülmektedir (Aves vd., 2022). Bilimsel araştırma sonuçlarından da görüldüğü üzere MNP'ler küresel su kaynaklarında yaygın olarak bulunmakta olup, biyokimyasal döngüleri bozarak, patojenlerin yayılmasını kolaylaştırarak ve yeni ortaya çıkan kirleticilerle etkileşime girerek su kalitesine dolaylı tehditler oluşturmaktadır. Her yıl tahminen 19 ila 23 milyon ton plastik atık su ekosistemlerine karışarak gölleri, nehirleri ve denizleri kirletmektedir. Küresel tahminler, su kaynaklarında 2016'da yaklaşık 2506  $\text{mg}/\text{m}^3$  olan MNP konsantrasyonunun 2030'da 5000  $\text{mg}/\text{m}^3$ 'e ulaşacağını, 2060'ta ise 10.000  $\text{mg}/\text{m}^3$ 'ü aşacağını göstermektedir (Liu vd., 2025; Kochanek vd., 2025; Zhao vd., 2025; Wang vd., 2026).

Genel olarak, okyanuslar, denizler ve nehirler gibi küresel su kaynaklarında ağırlıklı olarak MP'lerin varlığı araştırılmış olup analiz yöntemlerindeki zorluklar nedeniyle NP'ler daha az çalışılmıştır. Son yıllardaki çalışmaların ilgi odağı giderek daha küçük ve analitik olarak daha zorlu olan NP'lere doğru kaymaktadır. NP'ler, önemli ölçüde daha yüksek yüzey alanları, farklı kolloidal davranışları ve daha büyük parçacıklara göre biyolojik bariyerleri daha kolay geçebilme yetenekleri nedeniyle, özel analitik ve modelleme yaklaşımları gerektirmektedir. Boyutları 1  $\mu\text{m}$ 'den küçük partiküller olan NP'lerin, dokulara nüfuz etme, biyolojik olarak birikme ve fizyolojik işlevleri bozma yetenekleri MP'lerden daha fazla olup su ekosistemleri için önemli bir tehdit olarak kabul edilmektedir. 0,1–100  $\mu\text{g}/\text{mL}$  gibi düşük konsantrasyonlardaki NP partiküllere maruz kalma bile, tatlı sular ve denizlerde yaşayan mikroalgler, kabuklular ve balıklar gibi canlı organizmalarda oksidatif strese, membran hasarına, gelişim bozukluklarına, üreme değişikliklerine, bağışıklık ve sinir sistemi disfonksiyonuna neden olabilmektedir. MNP partiküllerin toksisitesini etkileyen faktörler arasında partikül boyutu, konsantrasyonu, polimer türü ve parçalanma durumu, maruz kalma süresi, organizma duyarlılığı, çevresel koşullar ve diğer kirleticilerin varlığı sayılabilir (Wang vd., 2026; Kargar vd., 2026). Bununla birlikte, tatlı su ortamları, okyanuslara eşit miktarda veya daha fazla plastik kirliliği içerebilir. MNP partiküller çok küçük olduğu için deniz canlılarının metabolizmalarında birikerek beyin de dahil olmak üzere organlara geçebilir. Araştırmalar, MNP'lerin, beyin ve sinir dokusunda strese ve iltihaplanmaya neden olarak, normal sinir sinyallemesini bozmak suretiyle su canlılarına zarar verebileceğini göstermektedir. Plastik kirliliği, özellikle kentsel toz, tarımsal akıntı, endüstriyel deşarjlar ve atık su deşarjları gibi karasal kaynaklardan gelen parçacıkların biriktiği su ortamlarında oldukça şiddetlidir. Atık su arıtma tesislerinde arıtıldıktan sonra deşarj edilen sular da denizler ve nehirler gibi farklı su

kaynaklarında MP kirliliğine yol açmaktadır. Deniz kirliliğinin önemli nedenleri arasında evsel atık su arıtma tesislerinin çıkış suları olduğu ileri sürülmektedir. Amerika, Avrupa, Avustralya ve Asya kıtalarının farklı lokasyonlarında yapılan çalışmalarda, evsel atık sularda daha çok kozmetik ürünler ve giysilerden kaynaklanan yüksek miktarlarda (0,2-25,8 partikül/L) MP olduğu tespit edilmiştir. Araştırmaların çoğu deniz ekosistemlerine odaklanmış olsa da, ortaya çıkan kanıtlar tatlı su ortamlarının da benzer veya hatta daha yüksek konsantrasyonlarda MNP içerebileceğini göstermektedir (Kazancı vd., 2023; Belanger ve Storks, 2026).

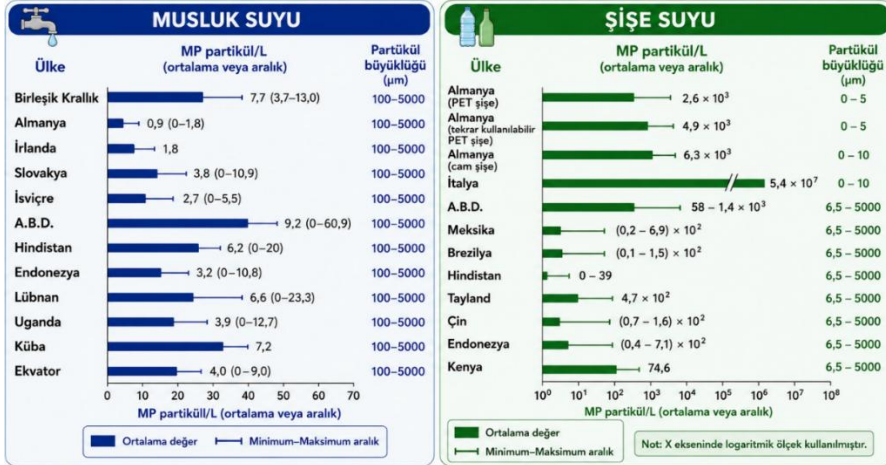
## 5. İçme Sularında Mikro ve Nano Plastikler (MNP)

Su, insan ve diğer tüm canlıların varlıklarını sürdürebilmeleri ve ekosistemlerin devamlılığı açısından vazgeçilmez doğal kaynaklardan biridir. İçme suyu olmasının yanı sıra; evsel (yemek pişirme, hijyen vd.), endüstriyel (sağlık, gıda, ulaşım, kimya, enerji üretimi, imalat vd.) ve tarımsal (sulama, pestisit uygulaması vd.) faaliyetlerde de önemli roller oynar. Ancak, günümüzde su kaynakları, hidromorfolojik değişiklikler, çevresel kirlilik ve aşırı kullanımdan kaynaklanan baskı altındadır. Yüksek kaliteli güvenli içme suyuna erişim, Birleşmiş Milletler (BM) tarafından tanınan temel bir insan hakkıdır. Bununla birlikte, küresel nüfusun yaklaşık %10'u yüksek veya kritik su stresi olan bölgelerde yaşamaktadır. Gelişmiş ülkelerde bile sürdürülebilir ve güvenli içme suyu temininde zorluklar devam etmektedir. Avrupa Birliği'nde, içme suyunun %65'i yeraltı sularından sağlanmasına rağmen, bu kaynağın %24'ü kimyasal olarak bozulmuş ve %9'u niceliksel sınırlamalar nedeniyle risk altında bulunmaktadır (Binelli vd., 2026).

Son yıllarda, tatlı sulardaki en yüksek MP düzeyleri ( $>5,4 \times 10^6$  MP/m<sup>3</sup>) dünyanın en büyük plastik üreticisi olan Çin'de ve zaman zaman ABD'deki bölgelerde izlenmiştir. Avrupa tatlı sularında ise MP konsantrasyonları genellikle 1-100 MP/m<sup>3</sup> arasında değişmektedir (Capodaglio, 2025). Okyanuslar, denizler, nehirler ve göller gibi yüzey sularında ve yeraltı sularında MP'lerin yaygın olarak bulunması içme sularında MP kontaminasyonunu gündeme getirmiştir. Yapılan bilimsel çalışmalar, yeraltı suları ve yüzey suları gibi farklı su kaynaklarından gelen arıtma işlemine tabi tutulmuş musluk (şebeke) sularında ve şişelenmiş sularda (tek kullanımlık plastikler ve cam ambalajlar) küresel düzeyde MP varlığını ortaya koymuştur. Çok küçük boyutları nedeniyle MP'ler su arıtma tesislerinden geçebilmektedir. Nitekim dünya genelinde musluk sularının %83'ünün MP içerdiği belirlenmiştir. İçme suları yoluyla MNP'lere maruz kalma, insan sağlığı üzerinde oluşturduğu potansiyel riskler nedeniyle artan endişelere yol açmaktadır. Erişilebilir temiz içme suyu, Birleşmiş Milletlerin sürdürülebilir kalkınma hedeflerinden biri olduğundan, içme suyu tüketiminden kaynaklanan MNP'leri ve insan sağlığı için ilgili riskleri güvenilir bir şekilde değerlendirmek son derece önemlidir (Koelmans vd., 2019; Kirstein vd., 2021; Chandra ve Walsh, 2024; Hart ve Lenhart, 2026).

İçme suyu temininin bireyler açısından başlıca iki yolu vardır. Bunların ilki ve en önemlisi arıtma tesislerinde arıtılan ve belediyelerin dağıtım şebekelerinden gelen

musluk suları, diğeri de farklı boyutlardaki plastik veya cam ambalajlarda ticari olarak satılan şişelenmiş sulardır. Güvenli ve kaliteli içme suyuna erişimde yaşanan zorluklar, çoğunlukla plastik ambalajlarda satılan şişelenmiş suya olan yaygın bağımlılığa katkıda bulunmaktadır. Küresel olarak, dakikada yaklaşık bir milyon adet plastik şişe suyu satılmaktadır. Şişelenmiş su, güvenli suya erişimi olmayan yaklaşık iki milyar insan için hayati önem taşıırken, birçok gelişmiş ülkede artan şişelenmiş su tüketimi, kolaylık, taşınabilirlik, algılanan sağlık yararları, musluk suyuna duyulan güvensizlik ve kişisel tercihlerden kaynaklanmaktadır. Öte yandan, uygun şekilde arıtılmış ve denetlenen musluk suyu tüketimi, plastik atıkların azalması, daha düşük çevresel ayak izi ve önemli ekonomik tasarruflar da dahil olmak üzere önemli avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, 1 litre şişelenmiş suyun döngüsü 17 ila 35 litre su tüketirken bertarafı ilgili enerji maliyetleri hariç, musluk suyuna göre yaklaşık 2000 kat daha fazla enerji gerektirir (Binelli vd., 2026). Çizelge 1’de bazı ülkelerde musluk suyu ve şişelenmiş sulardaki MP düzeyleri verilmiştir. Şekil 5. Bazı ülkelerde musluk suyu ve şişelenmiş sulardaki MP (mikroplastik) düzeyleri (Zang vd., 2020).



Şekil 5. Bazı ülkelerde musluk suyu ve şişelenmiş sulardaki MP (mikroplastik) düzeyleri (Chatgpt’de hazırlanmıştır)

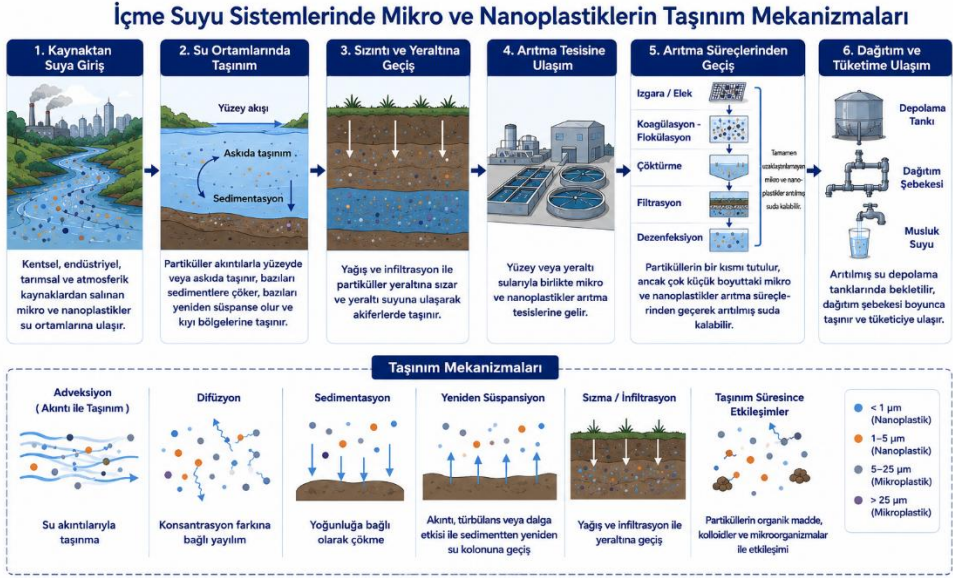
İçme suyunun güvenliğinin sağlanması, su kaynaklarından ve arıtma tesislerinden depolama ve dağıtım sistemlerine kadar tüm tedarik zinciri boyunca kapsamlı şekilde izlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla çok sayıda kalite parametresinin izlenmesi yasal mevzuatlarda zorunlu iken, yeni ortaya çıkan kirleticiler olarak plastik partiküllerle ilgili artan halk sağlığı endişelerine rağmen ülkelerin mevzuatlarına henüz bu konu dahil edilmemiştir (Binelli vd., 2026). İçme suyu arıtma tesislerindeki arıtma işlemlerini ve arıtma tesislerinden çıkan suyun kalite parametrelerini kontrol etmek kolay olsa da, karmaşık içme suyu şebekelerinden geçen suyun kalitesindeki değişiklikleri kontrol etmek son derece zordur. Yıllar içinde büyüyen içme suyu şebekelerinin malzeme yapısında da önemli



değişiklikler meydana gelir. Genellikle kullanılan ancak korozyon süreçlerine maruz kalan metal alaşımlı borular (örneğin; çelik, dökme demir), PVC, PE, PP veya cam elyaf takviyeli polyester (GRP) reçineleri gibi giderek daha gelişmiş plastiklerle kademeli olarak değiştirilmektedir. Yüksek düzeyde kentleşmiş bölgelerde PE bazlı su şebekeleri hakimken, kentleşmenin daha az olduğu bölgelerde PVC daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde boru hatlarında en yaygın kullanılan malzemeler ise yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve PVC'dir (Świetlik ve Magnucka, 2025). Su iletim borularından içme suyuna salınan MP ve NP'ler de, tüketiciler için potansiyel sağlık riski endişelerine yol açmaktadır. İçme suyu dağıtım şebekelerinde, uzun süreli kullanımdan sonra PE ve PVC borular bozunarak önemli bir MNP kaynağı olabilmektedir. Her iki plastik türü de nispeten hızlı yaşlanır ve boru yüzeyindeki hasar derecesi zamana ve çalışma koşullarına bağlıdır. PVC boruların yaşlanması; UV ışınları, yüksek sıcaklık, kimyasal maruziyet ve fiziksel stres sonucu malzemenin esnekliğini kaybedip kırılgan hale gelmesi sürecidir. Bu süreç, boruların yapısal deformasyona uğrayarak çatlamasına, sızıntı yapmasına ve içme suyu sistemlerinde potansiyel MP ve NP kirliliğine yol açabilir. Boru çapı azaldıkça plastik su borularındaki deformasyon artar. Bu durumda, içme suyunun küçük çaplı borularla sağlandığı şebekenin uç noktalarındaki bireyler en fazla MNP kirliliğine maruz kalanlardır. Yaşlanan PE ve PVC borular, içme suyundaki MP ve NP'lerin gerçek ve çok önemli bir kaynağı olarak kabul edilmeli ve yetkili otoriteler tarafından bu açıdan su kalitesi izlenmelidir. (Świetlik ve Magnucka, 2025).

Özellikle doğal su kaynaklarının ciddi kirlilik baskısıyla karşı karşıya olduğu bölgelerde, arıtılmış belediye su sistemlerinin ve ticari olarak şişelenmiş suyun geleneksel su kaynaklarına alternatif olarak kritik rolünü her geçen gün daha fazla ön plana çıkarmaktadır. Dünya genelinde 7,2 milyardan fazla insan günlük su ihtiyaçları için teknolojik olarak geliştirilmiş su arıtma süreçlerine bağımlı hale gelirken, yaklaşık 2,2 milyar insan da kamu sistemlerinin yetersiz olduğu durumlarda şişelenmiş ticari sulara güvenmektedir. Hem arıtılmış musluk sularında hem de şişelenmiş sularda MNP kirliliğinin ortaya çıkması, su güvenliği konusunda çevre ve halk sağlığı endişelerini gündeme getirmiştir. MNP kirlleticilerin oluşumu, şişeler, poşetler, lastikler ve çeşitli polimer türlerinden oluşan ambalaj malzemeleri de dahil olmak üzere yaygın plastik eşyaların mekanik olarak parçalanmasından kaynaklanmakta ve bu parçalar çevresel aşınma süreçleri yoluyla giderek mikro ve nano boyutta daha küçük parçacıklara ayrılmaktadır. MNP su kirliliği coğrafi sınırları aşarak, ileri düzeyde arıtma altyapısına sahip gelişmiş ülkelere, sınırlı arıtma kapasitesine sahip gelişmekte olan ülkelere kadar su sistemlerini etkilemektedir. MNP'lerin kontaminasyon yolu, özellikle şişelenmiş su sistemlerinde oldukça karmaşık bir özellik gösterir. Şişelenmiş suda MNP kontaminasyonu, suyun kaynağı, üretim prosesi, ambalajlama, depolama ve tüketici kullanımı da dahil olmak üzere çeşitli aşamalardan kaynaklanan çok yönlü bir sorundur. Plastik kaplar ve kapaklarda, aşınma ve sızma gibi MNP salınımında etkili olan mekanik süreçler, partiküllerin doğrudan suya kontamine olmasına yol açabilir

(Egbueri vd., 2026; Manono vd., 2026). Şekil 6'da içme suyu sistemlerinde MNP'lerin taşınım mekanizmaları verilmiştir



**Şekil 6.** İçme suyu sistemlerinde MNP'lerin taşınım mekanizması (Chatgpt'de hazırlanmıştır)

İçme sularında daha önce yapılan çalışmalarda MP'ler ayrıntılı bir şekilde incelenmiş olsa da, NP'ler yeterince incelenmemiş ve içme sularındaki NP varlığı tam olarak anlaşılamamıştır. Bu durum, esas olarak NP'leri izole etme ve analiz etme yöntemlerindeki sınırlamalardan ileri gelmektedir. Partikül boyutu azaldıkça partikül konsantrasyonundaki üstel artış, gerçek konsantrasyonun muhtemelen çok daha yüksek olduğunu göstermektedir. NP'ler, MP'lere göre sağlık için daha yüksek risk oluşturma potansiyeline sahiptir (Huang vd., 2022; Hart ve Lenhart, 2026).

Sonuç olarak, mikro ve nanoplastik kirliliği günümüzde küresel su güvenliği açısından önemli çevresel sorunlardan biri haline gelmiştir. İçme suyu sistemlerinde MNP varlığının belirlenmesi, yalnızca çevresel sürdürülebilirlik açısından değil, aynı zamanda halk sağlığının korunması bakımından da kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, içme suyu sistemlerinde MNP kaynaklarının belirlenmesi, standart analiz yöntemlerinin geliştirilmesi ve etkin kontrol stratejilerinin oluşturulması gerekmektedir.

## 6. İçme Sularında Mikro ve Nano Plastikler (MNP) İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Dünyanın farklı ülkelerinde, arıtma tesislerinde arıtılmış musluk (şebeke) sularında ve şişelenmiş sularda önemli düzeylerde MP tespit edilmesi, içme suları ile ilgili potansiyel sağlık endişelerini de beraberinde getirmektedir. Bu kapsamda, çeşitli ülkelerde yapılmış araştırma sonuçları, içme sularındaki MP kontaminasyonunun yaygınlığını ve özelliklerini ortaya koymaktadır. Musluk sularının (şebeke suyu/belediye içme suyu) başlıca kaynağı olan Dünya genelindeki yüzey sularında bulunan MP parçacıkların %91'inden fazlası 20 ile 100 µm, %8'i 100 ile 300 µm arasında olup geri kalanı 300 µm'den büyük olduğu bildirilmiştir. Diğer taraftan, yüzey sularında mevcut olan MP partiküllerin yaklaşık %64'ü lif şeklinde, kalan partiküller ise büyük oranda parçacık şeklindedir (Chandra ve Walsh, 2024).

Kuzey İtalya'daki Milano'nun su dağıtım sisteminde, içme suyu tedarik zincirinin tamamı boyunca plastik partikül kirliliğinin belirlendiği çalışmada; yeraltı suyu çekimi, arıtma sonrası aşamalar, bir halk çeşmesi ve on adet ev musluğu da dahil olmak üzere çeşitli noktalardan 14 adet anlık su örneği alınmıştır. Genel olarak, düşük konsantrasyonlarda plastik partikülleri tespit edilmiş olup bu değerler biriktirme tankında  $0,3 \pm 0,5$  partikül/L, evsel musluk suyunda ortalama  $1,9 \pm 1,4$  partikül/L düzeyinde bulunmuş ve tedarik zinciri boyunca önemli bir artış tespit edilmemiştir. Su örneklerinde selüloz parçacıkları (%76) ağırlıkta olup, plastikler ise sadece %8'lik bir oranda belirlenmiştir. Toplam MP'lerin %90 gibi büyük bir kısmını boyutları 1 µm–1 mm arasındaki MP partikülleri, geri kalan %10'luk kısmını ise büyük boyutlu MP'ler (1–5 mm) oluşturmuş, polimer türü olarak en fazla polyester lifleri tespit edilmiştir. Bununla birlikte, özel konutlardan alınan musluk suyu örneklerinde daha fazla MP değişkenliği ve daha yüksek konsantrasyonlar bulunmuş olup iç tesisat sistemlerinin birincil kirlilik kaynağı olabileceği ileri sürülmüştür (Binelli vd., 2026). Başka bir çalışmada, Kuzeydoğu İtalya'da bir yüzey suyu arıtma tesisinden alınan 32 arıtılmış içme suyu örneğindeki MP kirliliği, µ-FT-IR (mikro-Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi) kullanılarak analiz edilmiş ve tüm su örneklerinin litre başına 170 partikülden az MP içerdiği saptanmıştır. Sonuçların Avrupa içme suyu standartlarıyla uyumlu olduğu ve MP kirlilik seviyesinin düşük düzeyde olduğu belirlenmiştir. Tespit edilen MP polimerlerin ağırlıklı bir kısmını (%50,2) boyutları 50–500 µm arasında değişen PP ve PE gibi poliolefinler oluşturmuş, PET ise 10–50 µm arası boyutlarda ve çok düşük (%0,1) düzeyde bulunmuştur (Dalla Fontana vd., 2026). Veriler, yoğunluğu sudan daha düşük olan MP'lerin (PE 0,94 g/cm<sup>3</sup> ve PP 0,90 g/cm<sup>3</sup>) miktarının önemli ölçüde daha yüksek olduğunu ortaya koyarken bu durum polimerlerin uzaklaştırılmasındaki zorluğu göstermektedir (İñiguez vd., 2017; Dalla Fontana vd., 2026). Bir diğer çalışmada, Sforzi vd., (2026); İtalya'da tek kullanımlık toplam 60 adet plastik şişe suyu örneğinde ortalama  $7,6 \pm 8,4$  partikül/L düzeyinde MP belirlemişlerdir. En fazla siyah, mavi ve kırmızı renkli partiküller tespit edilmiş ve polimer türü olarak

sırasıyla en çok tekstil selülozu (%78,2), PE (%12,8), PET (%6,0), PP (%1,5) ve PA (%1,5) bulunmuştur. Tekstil selülozunun insan kaynaklı partiküller olduğu ileri sürülmüştür.

Çin’de farklı şehirlerden temin edilen 38 musluk suyu örneğinde gerçekleştirilen çalışmada  $440 \pm 275$  partikül/L arasında değişen düzeylerde MP varlığı saptanmış ve örneklerin çoğunda ağırlıklı olarak  $50 \mu\text{m}$ ’den daha küçük boyutlu partiküllerin baskın olduğu tespit edilmiştir. Şekil olarak en fazla bulunan partikül tipinin parçacık formunda olduğu, bunu lif ve küresel şekilli partiküllerin izlediği, polimer türü olarak da en fazla PE ve PP olduğu tespit edilmiştir. Araştırmacılar, arıtma tesislerinde, şebeke (musluk) sularındaki MP kontaminasyonunu gidermek için önlem alınmasının halk sağlığı açısından önem taşıdığını vurgulamıştır (Tong vd., 2020). Çin’in güney batısında dağlarla çevrili plato bölgesinde yer alan Guizhou Eyaleti’nde yapılan bir başka çalışmada (Xiong vd., 2025), 164 adet musluk suyu örneğinde ortalama  $3,8 \pm 3,8$  partikül/mL ve 4 farklı ticari markaya ait 12 şişe suyu örneğinde  $1,3 \pm 3,2$  partikül/mL düzeyinde MP saptanmıştır. Tüm örneklerde belirlenen MP partiküllerin %50’den fazlasının boyutları 10–20  $\mu\text{m}$  arasında olduğu bildirilmiştir.

Birleşik Krallık’ta 13 farklı şehirden alınan 177 adet musluk suyu örneğinde 6-100 partikül/L, 17 popüler markaya ait 85 adet şişe suyu örneğinde 12-62 partikül/L arasında MP varlığı saptanmış, musluk sularının ortalama MP kontaminasyonu ( $40 \pm 16$  partikül/L) ile şişe sularının ortalama MP konsantrasyonu arasında ( $37 \pm 11$  partikül/L) önemli bir farklılık tespit edilememiştir. En fazla saptanan polimer türleri musluk sularında PE, PP, PVC, şişe sularında ise PE, PP ve PET olmuştur. Parçacıklar ve lifler en fazla bulunan MP şekli olup, musluk suyu ve şişe suyu örneklerinde tespit edilen MP’lerin sırasıyla %92 ve %96’sını oluşturmuşlardır. Musluk sularının ortalama partikül büyüklüğünün ( $32,4 \mu\text{m}$ ) şişe sularından ( $26,5 \mu\text{m}$ ) daha fazla çıkması, şişe sularının uygulanan arıtma işlemlerinin büyük partikülleri daha etkili bir şekilde uzaklaştırdığını göstermektedir. Ancak, daha küçük MP’lere maruz kalmanın oluşturacağı sağlık üzerindeki potansiyel olumsuz etkiler endişeleri de artırmaktadır. EFSA (Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi) tarafından önerilen günlük su alım miktarları dikkate alındığında, Birleşik Krallık’ta MP’lere maruz kalma düzeyleri, bebekler ve küçük çocuklarda (4 partikül/kg vücut ağırlığı/gün) yetişkinlere göre (1 partikül/kg vücut ağırlığı/gün) daha yüksek düzeydedir. Bu durum, bebeklerin bağışıklık ve sinir sistemlerinin yeterince gelişmemiş olması nedeniyle, bu tür maruziyetlerden kaynaklanan olumsuz sağlık etkilerine karşı daha yüksek risk altında olduklarını göstermektedir (Al-Mansoori vd., 2025).

Musluk ve şişelenmiş sularda MP’lerin bulunması, söz konusu MP’lerin polimerik bileşimleri, üretimlerinde kullanılan katkı maddeleri, yüzeylerine yapışan toksik bileşikler ve mikroorganizmalar nedeniyle toksik etkiye yol açabileceğinden küresel olarak halk sağlığı endişelerini artırmaktadır. Parçacık boyutu küçüldükçe

MP konsantrasyonu artış göstermekte ve şişe sularında musluk sularına göre daha yüksek olmaktadır. Şişe suları arasında, yeniden kullanılabilir PET ve cam şişeler diğer ambalaj materyallerine göre daha yüksek düzeyde MP kontaminasyonuna yol açmaktadır. Çeşme sularındaki MP düzeyinin doğal kaynaklara göre daha düşük olması, içme suyu arıtma tesislerinde uygulanan arıtma işlemleriyle MP'lerin büyük oranda giderildiğini göstermektedir. Bu durum, tüketicileri şişe suları yerine musluk sularını içmeye teşvik eder niteliktedir. Ancak, araştırma sonuçları arasındaki farklılıkların yüksek olması, insan sağlığı üzerinde oluşturacağı potansiyel riskler hakkında genel bir hipotez oluşturmayı zorlaştırmaktadır. Avrupa Birliği (AB) düzenlemesiyle getirilen MP'ler de dahil olmak üzere ortaya çıkan kirleticiler için izleme planları dikkate alındığında, sonuçları uyumlu hale getirmek için küresel olarak kabul edilen bir protokole ihtiyaç vardır (Gambino vd., 2022).

Vietnam'ın en yüksek nüfus yoğunluğuna sahip Kızıl Nehir Deltası'nda 5 farklı lokasyondaki evlerden alınan toplam 25 adet musluk suyu örneğinde 2-16 partikül/L arasında değişen düzeylerde (ortalama 6,8 partikül/L) MP tespit edilmiştir. MP partiküllerin büyük bir kısmı parçacık ve lif şeklinde olup büyüklükleri 200 µm'un altında ölçülmüştür. Musluk suyunda MP'lerin bulunması potansiyel çevre ve halk sağlığı endişelerine neden olmaktadır. Ortaya çıkan riskleri azaltmak için, içme suyu arıtma tesislerinde uygulanan proseslerin iyileştirilerek arıtmanın daha etkili bir şekilde yapılması gerekir (Pham vd., 2026).

Shi vd., (2026); Avustralya'nın nüfus yoğunluğu bakımından en büyük üçüncü şehri Brisbani'de 23 konuttan ve 10 ayrı su dolum istasyonundan aldıkları musluk sularında ve 4 büyük şişelenmiş su markasına ait toplam 8 şişe suyu örneğinde ortalama MP konsantrasyonunu 0,5-1,5 µg/L, NP konsantrasyonunu ise 0,3-0,7 µg/L arasında belirlemişlerdir. PP, Nylon-66, Nylon-6, PS ve PET gibi en fazla tanımlanan polimerler plastik borular, su filtreleme sistemleri ve endüstriyel veya evsel faaliyetler gibi ortak kaynaklara işaret etmektedir. Musluk sularında NP partiküllerin sayısı 106-107 partikül/mL arasında hesaplanmıştır. Musluk sularında şişe sularına göre önemli oranda daha yüksek MP ve NP konsantrasyonu saptanmış olup bu durumun eskiyen şebeke suyu altyapısından, su arıtma prosesinden ve çevresel faktörlerden kaynaklandığı ileri sürülmüştür. Başka bir çalışmada, Avustralya'da 16 farklı ticari markaya ait (11'i yerli, 5'i ithal) şişe sularında çoğunluğu PP olmak üzere 0-80 partikül/L arasında değişen miktarlarda (ortalama  $13 \pm 19$  partikül) MP belirlenmiş ve MP'lerin ortalama büyüklüğü  $77 \pm 22$  µm olmuştur. İthal şişe sularında yerli üretim sulara göre yaklaşık 4 kat daha fazla MP tespit edilmiştir. Olası kirlenme kaynaklarının ambalaj, şişe kapağı ve kaynak suyu olabileceği ileri sürülmüştür. 2017 yılında Avustralya nüfusunun %28,3'ünün ortalama 30,8 litre şişelenmiş su tükettiği tahmin edilmektedir. Çalışmadan elde edilen verilere göre, Avustralyalıların şişelenmiş su tüketimi yoluyla yılda yaklaşık 400 MP maruziyetine uğradığı tahmin edilmektedir (Samandra vd., 2022).

Dalu vd., (2025); Güney Afrika'nın Nelspruit şehrinde belediye içme suyunun kullanıldığı farklı lokasyonlardaki evlerden aldıkları toplam 97 adet musluk suyu örneğinde MP varlığını tespit etmişlerdir. En fazla bulunan plastik türleri düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve etilen propilen dien terpolimer (EPDM) olmuş, farklı konsantrasyon ve değişik renklerde, ağırlıklı olarak parçacık ve lif şeklinde MP partiküller tespit edilmiştir. MP'lerin bulunma konsantrasyonları ile renkleri ve şekilleri açısından lokasyonlar arasında önemli bir farklılık tespit edilememiş ve bulguların bölge sakinleri için evsel içme suyunun potansiyel ekotoksikolojik etkiler taşıdığı ileri sürülmüştür. MP'lerin eskiyen boru hatları, atmosferik birikim ve kentsel akıntıdan kaynaklanan ikincil kirlenme yoluyla su dağıtım sistemlerine girebileceğini, daha etkili bir arıtma için de membran filtrasyon tekniği gibi daha etkili işlemlerin uygulanmasının gerekli olduğu belirtilmiştir.

Prasertboonyai vd., (2025); Tayland'ın önemli endüstriyel bölgelerinden Rayong Eyaletinde incelenen tüm su arıtma tesislerinde, arıtmaya gelen sulara 1,0-18,15 partikül/L ve arıtma sonrası musluk sularında ise 0,51-11,20 partikül/L arasında değişen düzeylerde MP saptamışlardır. Arıtmaların etkinliği MP partiküllerin boyutuna, şekline ve polimer yoğunluğuna bağlı olarak %33,13-63,12 arasında değişmiştir. Özellikle 250 µm'nin altındaki partiküllerde parçacık ve lif şekli yaygın olarak bulunmuş, en fazla tespit edilen polimer türleri PES, PET ve PP olmuştur. Arıtılmış sulara epoksi reçine, poliakrilamid (PAM), PVC ve klorlu polietilen (CPE) saptanmışken arıtılmamış sulara bu kimyasallar tespit edilememiş ve söz konusu durumun arıtma prosesinde kullanılan kimyasallardan kaynaklanan ikincil bir kontaminasyon olduğu ileri sürülmüştür. Diğer taraftan, evlerdeki musluk sularının MP konsantrasyonunun arıtma sonrası sulardan daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu durumun evlerde yapılan ek arıtmadan ileri geldiği ifade edilmiştir. Tahmini günlük alım analizine göre en yüksek MP maruziyetinin sırasıyla bebeklerde (0,355 partikül/kg vücut ağırlığı/gün), yetişkinlerde (0,184-0,201 partikül/kg vücut ağırlığı/gün) ve çocuklarda (0,108 partikül/kg vücut ağırlığı/gün) olduğu saptanmıştır. Elde edilen bulguların yaygın bir MP kontaminasyonu ve potansiyel sağlık risklerine işaret ettiği, acil olarak daha gelişmiş arıtma tekniklerine ve uzun vadeli etkiler konusunda araştırmalara ihtiyaç olduğu belirtilmiştir.

Güney Kore'de yapılan bir çalışmada (Jung vd., 2022); içme suyu arıtma tesislerine Nakdong Nehrinden gelen sulara MP varlığının mevsimsel olarak değişiklik gösterdiği, sulara ağırlıklı olarak PE ve PET bulunduğu ancak MP'lerin büyüklük dağılımında önemli farklılıklar olmadığı belirlenmiştir. Nehirden gelen sulara MP'lerin arıtma tesisinde %90'dan fazlasının uzaklaştırıldığı ancak tespit limitinin altındaki 20 µm'den küçük MP'lerin içme suyu arıtma tesislerinden arıtılmış sularla insanlara geçebileceği ve bu nedenle arıtma tesislerinde nanopartiküllerinde tespit edilmesinin önemli olduğu ileri sürülmüştür.

Fransa'nın Paris bölgesinde yer alan üç adet içme suyu arıtma tesisinde nehir giriş suyunda ve arıtılmış içme sularında MP kirliliği incelenmiştir.  $\mu$ -FT-IR yöntemiyle 25–5,000  $\mu$ m arasındaki MP partiküller belirlenmiş olup arıtma tesislerinde nano-filtrasyon işlemi uygulanmaktadır. Nehirden gelen su örneklerinde 7,4-45,0 partikül/L, arıtılmış içme suyu örneklerinde ise 0,003-0,260 partikül/L arasında MP saptanmış olup arıtma sisteminin %99 oranında arıtma sağladığı belirlenmiştir. Mikrofiltrasyon ve nano-filtrasyon gibi membran arıtma işlemlerinin konvansiyonel arıtmalara göre çok daha etkin olduğu ileri sürülmüştür (Barbier vd., 2022).

İspanya/Barselona'da özel konutların mutfak musluklarından 39 su örneği ve halka açık çeşmelerden 3 su örneği olmak üzere toplam 42 içme suyu örneğinde 0,7 ila 20  $\mu$ m boyutlarındaki MNP'lerin analizi yapılmış ve toplam MNP konsantrasyonu ortalama 514 ng/L olarak belirlenmiştir. Örneklerin 41'inde MNP polimer varlığı saptanmış olup sadece birisinde (%2,3) tespit edilebilir düzeyde polimer bulunamamıştır. Polimer türü olarak PE, PP, poliizopren (PI), polibütadien (PBD), PS, PA ve polidimetilsiloksan (PDMS) polimerleri tespit edilmiştir. En fazla belirlenen polimerler PE, PA ve PP olmuştur. PE ve PP'nin, içme suyu sistemlerindeki plastik parçalar, içme suyu boruları ve çeşitli ev eşyaları da dahil olmak üzere geniş bir kullanım alanına sahip olması, içme suyu sistemlerinde bulunmalarının nedeni olduğu düşünülmektedir. MNP konsantrasyonunun, diğer Avrupa şehirlerinde şebeke sularında belirlenen konsantrasyonlara benzerlik gösterdiği ileri sürülmüştür. Yetişkinler için günde ortalama 2 L su tüketimi dikkate alındığında, içme suları yoluyla yılda kişi başına alınan polimer miktarı 339  $\mu$ g olarak hesaplanmıştır (Herrera vd., 2022). İspanya/Barselona'da yapılan başka bir çalışmada, 15'i maden suyu ve 5'i de kaynak suyu olmak üzere marketlerde satılan 20 farklı popüler ticari markaya ait tek kullanımlık PET şişe sularında 700 nm – 20  $\mu$ m arasındaki MNP'ler analiz edilmiştir. Her bir markadan 1,5 L'lik 4'er adet ve 0,5 L'lik 10'ar adet şişe suyu alınmıştır. Örneklerin büyük bir kısmında (%93) MNP konsantrasyonu 1000 ng/L'nin altında bulunmuştur. Su örneklerinde en sık tespit edilen polimer PE, en yüksek konsantrasyonda bulunan polimer ise PET olmuştur (4700 ng/L). Şişelenmiş sularda 28 farklı plastik katkı maddesinin varlığı tespit edilmiş, bis(2-etilheksil) adipat ve bis(2-etilheksil) ftalatın insan sağlığı için en riskli plastik katkı maddeleri olduğu ileri sürülmüştür. Örneklerin tamamında en az bir adet katkı maddesi saptanmış, stabilizörler ve plastikleştiriciler en yaygın bulunan katkı maddeleri olmuştur. Yetişkinler için günde ortalama 2 L su tüketimi dikkate alındığında, şişe suları yoluyla yılda kişi başına alınan polimer miktarı 262  $\mu$ g olarak hesaplanmıştır (Herrera vd., 2023).

Çek Cumhuriyeti'nde 3 farklı içme suyu arıtma tesisine farklı kaynaklardan gelen sularda ve arıtılmış sularda yapılan analizlerde, tüm su örneklerinde MP varlığı tespit edilmiştir. Arıtılmamış sularda  $1473 \pm 34$  -  $3605 \pm 497$  partikül/L, arıtılmış sularda ise  $338 \pm 76$  -  $628 \pm 28$  partikül/L arasında MP belirlenmiştir. Arıtılmış suların MP içeriği arıtılmamış sulardan ortalama %83 daha düşük çıkmıştır. MP partiküllerin %95 gibi

büyük bir kısmı 1–10 µm arasında olup ağırlıklı plastik türü olarak (>%70) PET, PP ve PE saptanmıştır (Pivokonsky vd., 2018).

Plastik şişelerin yüksek kapasitede endüstriyel ölçekli üretimi enjeksiyon yöntemiyle yapılmakta olup üretim sırasında partiküllerin etkili bir şekilde uzaklaştırılamaması potansiyel bir MNP kaynağı oluşturur. Enjeksiyon yöntemiyle üretilmiş genel kullanım amaçlı PP şişelerde, PE ve PP gibi MNP partiküller 1-60 µg/L arasında değişen konsantrasyonlarda tespit edilmiş ve NP'lerin MP'lerden yaklaşık 100 kat daha fazla konsantrasyonda olduğu saptanmıştır (Wang vd., 2024). Şişelenmiş sulardaki MNP'lerin kimyasal bileşimi büyük ölçüde şişelerin ve kapaklarının üretiminde kullanılan malzemeleri yansıtır. Genel olarak şişe gövdelerinin üretiminde PET, şişe kapaklarının üretiminde de PP kullanıldığı için plastik şişelerde şişelenmiş içme sularında en sık tanımlanan polimer türleri PET ve PP'dir. Polifenilen sülfon (PPSU) reçineleri ve polikarbonat (PC) ayrıca biberonlarda da tespit edilmiştir. Bazı çalışmalarda ise plastik ambalaj malzemesinin yanında doğal tekstillerden kaynaklanan selüloz bazlı polimerler de belirlenmiştir (Manono vd., 2026).

A.B.D.'nin önde gelen 8 şişelenmiş su markasından alınan 500 ml'lik PET şişe suları, araçlarda ve dış ortamda muhafaza koşullarını simüle etmek üzere yüksek sıcaklıkta (60 °C'de 12 sa.), düşük sıcaklıkta (-12 °C'de 24 sa.) ve mekanik çalkalamada (200 devir/dk) 15 gün boyunca MNP içeriği bakımından test edilmiştir. PET şişelerin ısıtılması ve çalkalanması sonrasında en yüksek (9,29 kat) NP konsantrasyonu belirlenmiş ve MP partiküller de önemli oranda artmıştır. Yüksek sıcaklık döngüsü (yazın otomobilde bırakılan bir PET su şişesinin ulaştığı sıcaklık) ve dondurma (-12 °C'de 24 sa.) NP konsantrasyonunu önemli oranda artırmış, MP salınımı ise düşük düzeyde kalmıştır. Hem şişe gövdesinden hem de kapaklarından kaynaklanan PET, PE ve PP partiküller tüm örneklerde belirlenmiştir. Bulgular, NP ve MP plastiklerin günlük yaşam koşullarındaki sıcaklık değişimleri ve mekanik işlemlerle serbest hale geçtiğini göstermektedir (Hussain vd., 2026). A.B.D.'de yapılan başka bir çalışmada, 6 farklı ticari firmaya ait PET şişelerde PE kapakla kapatılmış şişe sularında ve Ohio Eyaletinin Erie Gölü kıyılarındaki konvansiyonel yöntemle arıtma yapan 4 farklı su arıtma tesisinden alınan arıtılmış içme sularında yapılan MNP analizinde (Hart ve Lenhart, 2026); içme sularında 1,6-2,6 milyon partikül/L, şişe sularında ise 2,6-11,5 milyon partikül/L arasında MNP tespit edilmiştir. Şişe sularındaki MNP düzeyi arıtılmış içme sularından daha yüksek bulunmuştur. İçme sularındaki NP'ler (<1 µm) toplam partiküllerin %50'den fazlasını, şişe sularındaki NP'ler ise toplam partiküllerin ortalama %66 gibi büyük bir kısmını oluşturmuştur. Arıtılmış içme suyu örneklerindeki MNP'lerin kütle konsantrasyonu 2,0-14,7 µg/L arasında (ortalama 6,8 µg/L), şişelenmiş su örneklerinde ise 0,62 ile 4,0 µg/L arasında (ortalama 2,16 µg/L) değişmiştir. Her iki örnek setinde de, daha büyük boyutları nedeniyle toplam MNP kütlelerinin büyük bir kısmını MP'ler, %5'inden daha azını ise NP'ler oluşturmuştur. Polimer türü olarak şişe sularında en fazla PET, PE ve kauçuk, arıtılmış içme sularında ise PA, kauçuk



ve PES (PET'i de içeren polyester) saptanmıştır. Söz konusu polimerlerin arıtmaya gelen su kaynağında bulunabileceği gibi arıtma sırasında da karışmış olabileceği belirtilmiştir. Her iki örnek grubunda da, kauçuğun en fazla bulunan polimer türleri arasında yer alması dikkat çekicidir. Oysa, içme sularında daha önce yapılan çalışmaların çok azında kauçuk varlığından bahsedilmiştir. Bu bulgu, kauçuğun içme sularında düşünüldüğünden daha yaygın olabileceğini ve muhtemelen arıtma altyapısındaki elastomerik bileşenlerden veya kaynak sularındaki kirlilikten ileri geldiği söylenebilir. Elde edilen veriler, önceki çalışmaların hem arıtılmış musluk suyunda hem de şişelenmiş suda MNP parçacık konsantrasyonlarını hafife aldığını göstermektedir. Arıtılmış içme suyundaki potansiyel MNP kaynaklarını belirlemek oldukça zordur. Çünkü MNP'ler arıtma tesisinin içinden (örneğin; plastik armatürler, arıtma kimyasalları) kaynaklanmış olabilir, ancak kaynak sudan tamamen uzaklaştırılmamış olmaları daha olası görünmektedir. Bu çalışmaya, MP'lerle birlikte NP'lerin de dahil edilmesi içme sularındaki kontaminasyonun boyutunu ortaya koymuştur. Zira her iki örnek türünde de tespit edilen partiküllerin %50'sinden fazlasını NP'ler oluşturmuştur. Özellikle insan vücuduna alındıktan sonra daha hareketli olduğu düşünülen nanopartiküller olmak üzere, MNP'lere maruz kalmayı en aza indirmek için şişelenmiş su tüketimini azaltmanın etkili bir strateji olabileceği görülmektedir.

Hindistan'da 6 farklı ticari markaya ait şişe suyu örneklerinin tamamında 808-1888 partikül/L arasında değişen miktarlarda (ortalama  $1279,3 \pm 128,6$  partikül/L) MP tespit edilmiştir. Partiküllerin büyük bir kısmının (>%91) boyutu  $40 \mu\text{m}$ 'dan küçük olup en fazla bulunan polimer türleri PET, PE, PP ve PS'dir. Söz konusu polimerler su şişelerinin yapımında en çok kullanılan polimerler olup şişe gövdesi, kapakları ve kullanım kaynaklı bozulmanın MP'lerin başlıca kaynakları olduğunu göstermektedir. Vücut ağırlığı bazında değerlendirildiğinde, yetişkinlerin (65 kg) günde kg vücut ağırlığı başına 0,28-1,19 MP partikül, çocukların (15 kg) ise 1,3 MP partikül tüketme riski olduğu hesaplanmıştır (Pawak vd., 2026).

Malta Cumhuriyeti'nde üretilip satılan 5 farklı ticari markaya ait şişelenmiş 50 adet su örneğinin %84'ünde MP kontaminasyonu saptanmıştır. Ortalama kontaminasyon değeri  $35,877 \pm 23,542$  partikül/L, ortalama partikül boyutu  $2,37 \pm 0,0035 \mu\text{m}$  olarak belirlenmiş ve partiküllerin %95'inin boyutları  $\leq 5 \mu\text{m}$ 'dan küçük olmuştur. Ölçüm limitinin altında kalması nedeniyle  $1,45 \mu\text{m}$ 'dan küçük partiküller tespit edilememiştir (Camilleri vd., 2025).

İçme suyu pazarında önemli paya sahip 9 farklı ülkede satılan, uluslararası bilinirliği yüksek 11 ticari markaya ait toplam 259 şişelenmiş su örneğinin %93'ünde MP saptanmıştır. Büyüklüğü  $100 \mu\text{m}$ 'un üzerinde ortalama 10,4 partikül/L, büyüklüğü 6,5-100  $\mu\text{m}$  arasında (toplam partiküllerin %95'i) ise ortalama 325 partikül/L düzeyinde MP varlığı tespit edilmiştir. En fazla, parçacık (%66) ve lif şeklindeki partiküller bulunmuş, ağırlıklı olarak belirlenen polimer türü ise şişe kapaklarından geçtiği düşünülen PP (%54) olmuştur. MP kontaminasyonunun daha

çok suların şişelenme prosesi ve ambalajdan kaynaklandığı ileri sürülmüştür (Mason vd., 2018).

Çin’de 7’si PET şişede, 3’ü de cam şişede olmak üzere bilinen 10 farklı ticari markaya ait şişe sularında yapılan çalışmada (Li vd., 2023); PET şişe ( $65,62 \pm 44,65$  partikül/L) ve cam şişe sularında ( $87,94 \pm 46,38$  partikül/L) musluk suyundan ( $49,67 \pm 21,43$  partikül/L) daha fazla MP tespit edilmiş, şişe sularında ağırlıklı olarak selüloz ve PVC, musluk suyunda ise PCV, kauçuk, silikon, poliakrilamid ve PET bulunmuştur. Gerek şişe suları gerekse de musluk suyunda küçük boyutlu MP’lerin ( $10-50 \mu\text{m}$ ) daha fazla olduğu ve bunların büyük boyutlu MP’lere göre sağlık üzerinde daha büyük tehlikeler oluşturabileceği ileri sürülmüştür. Bebeklerin, çocuklar ve yetişkinlere göre daha fazla MP’ye maruz kaldığı belirtilmiştir.

Tayland’da 10 farklı ticari markaya ait tek kullanımlık PET şişe sularında ortalama  $140 \pm 19$  partikül/L, cam şişe sularında  $52 \pm 4$  partikül/L düzeyinde MP bulunmuş, PET şişelerdeki MP düzeyi cam olanlardan daha yüksek çıkmıştır. Küçük partiküller, PET ( $6,5-20 \mu\text{m}$ ) ve cam şişelerde ( $20-50 \mu\text{m}$ ) büyüklükleri  $\geq 50 \mu\text{m}$  olan MP’lerden daha yoğun bulunmuş, ağırlıklı polimer türleri PET, PE, PP ve PA olmuştur. MP kontaminasyonunun üretim prosesi ve ambalaj materyalinden kaynaklandığı ileri sürülmüştür (Kankanige ve Babel., 2020).

Qian vd., (2024); Çin’de 3 farklı ticari firmaya ait şişe sularında  $2,4 \pm 1,3 \times 10^5$  partikül/L düzeyinde MNP tespit etmişler ve söz konusu MNP’lerin yaklaşık %90’ının NP olduğunu belirlemişlerdir. MNP düzeyinin, daha önceki araştırmalarda şişe sularında saptanan MP düzeyinin kat kat üzerinde olduğu ve NP’lerin, MP’lere göre insan vücuduna girme olasılıklarının çok daha yüksek olması sebebiyle daha toksik olabileceği ileri sürülmüştür. MNP’lerin polimer türünün markadan markaya farklılık göstermekle birlikte genelde PA, PP, PET, PVC ve PS’nin şişe sularında tespit edildiği ancak analizi yapılan 3 farklı markaya ait su örneğinde PA’nın daha ağırlıkta olduğu belirlenmiştir. Geleneksel görüntüleme yöntemleriyle daha önce görünmeyen nano boyutlu partiküller aslında sayıca çok daha fazla olup tespit edilen tüm plastik partiküllerin yaklaşık %90’ını oluşturmaktadır.

Plastik ya da cam şişelerin kapaklarının açılıp kapatılması her defasında MP’lerin suya geçmesine yol açmaktadır. Kapakların 100 defa açılıp kapanmasıyla yaklaşık 53-393 partikül/mL arasında MP’nin suya geçtiği tespit edilmiştir. Şişe sularının markası ve şişe türü (plastik veya cam) suya karışan MP düzeyini etkilemekte, yüksek kaliteli plastik ve cam şişelerden suya geçen MP düzeyi çok daha düşük olmaktadır (Song vd., 2021). Winkler vd., (2022)’de, plastik su şişelerinin günlük kullanımı sırasında maruz kaldığı mekanik etkilerin MP ve NP salınımını etkilediğini, şişe kapaklarının her açılıp-kapanışı ile birkaç yüz nanometreden yaklaşık bir mikrona kadar değişen boyut dağılımına sahip NP partiküllerin salınarak suya karışabildiğini ileri sürmüştür. Yapılan bilimsel araştırma sonuçları, içme suyu arıtma tesislerinde plastiklerin sudan uzaklaştırılma etkinliği uygulanan arıtma işlemine bağlı olarak değişiklik gösterir. Konvansiyonel arıtma sistemlerinde orta

düzeyde (yaklaşık %70) bir arıtma sağlanırken, karbon filtrasyonu, ozonlama ve membran filtrelerin kullanıldığı gelişmiş arıtma tesislerinde MP'ler %90-100 düzeyinde uzaklaştırılabilmektedir. Gelişmiş arıtma tesislerinde MP'ler etkili bir şekilde uzaklaştırılırken, NP'lerin de arıtılarak içme sularından uzaklaştırılması önem taşımaktadır (Pivokonsky vd., 2018; Wang vd., 2020; Jung vd, 2022; Barbier vd., 2022; Prasertboonyai vd., 2025). Küresel ölçekte yapılan 89 farklı araştırmanın değerlendirmesinde (Egbueri vd., 2026); şişelenmiş içme sularında 0 ile >10,000 partikül/L, arıtma tesislerinde arıtılmış sularda ise <1 ile 1401 partikül/L arasında MP varlığı tespit edilmiştir. Yaygın görülen PET, PP, PE gibi polimerler yanında etilen-propilen-dien monomer (EPDM), poliakrilonitril (PACN) ve klorlu polietilen (CPE) gibi spesifik polimerler de belirlenmiştir. Şekil olarak lif ve parçacık şekilli polimerler ağırlıklı olarak bulunurken az görülen kübik, pul ve köpük şeklindeki polimerlere de rastlanmıştır. Şişelenmiş sularda, spesifik polimerler ve şekil olarak az görülen polimerler, arıtılmış sulardan daha fazla bulunmuştur. Bölgesel analiz, Asya-Pasifik ve Avrupa ülkelerinde MP'lere maruz kalma düzeyinin daha yüksek olduğunu göstermektedir. MP'lerin arıtılmış içme suları ve şişelenmiş sulardaki varlığı, mevcut pek çok su arıtma sisteminin verimliliğinin yetersiz kaldığını ve bu konudaki yasal düzenlemelerin güncellenmesinin gerekli olduğunu ortaya koymaktadır.

İçme suyunun kaynağı, ortam kirliliğinden ileri gelen MP'leri içerebilirken, giderek artan kanıtlar, ambalaj malzemelerinin ve taşıma uygulamalarının şişelenmiş sudaki MP yüküne önemli ölçüde katkıda bulunduğunu göstermektedir. Suyun kaynağından çıkarılması ve arıtılmasından şişelemeye ve taşımaya kadar içme suyu üretiminin neredeyse her aşamasında MP'ler suya geçebilmektedir. PE ve PP, şişelenmiş suda yaygın olarak bulunan polimerlerdir. Yapılan çalışmalar, ambalajın kendisinin özellikle PET şişelerin ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) kapakların önemli bir salınım kaynağı olduğunu göstermektedir. HDPE şişe kapaklarının 100 döngüye kadar tekrar tekrar açılıp kapanmasının, esas olarak kapak-boyun arayüzündeki aşınma nedeniyle, kapak başına bir milyondan fazla parçacığın salınmasına yol açabileceği belirtilmiştir. HDPE formülasyonlarında behenamid gibi kayganlaştırıcı katkı maddelerinin bulunmasının, yüzey bozulmasını ve partikül dökülmesini artırdığı saptanmıştır. Şişeyi bükme, sıkma ve sallama gibi tipik tüketici davranışlarının bir parçası olan eylemler, malzeme gerilimi veya yüzey aşınmasına yol açarak suya MP salınımını artırmaktadır. Sıcaklık dalgalanmaları ve foto-oksidatif bozulma, özellikle kötü saklanan şişelerde, polimerin kırılgenliğini ve parçalanmasını daha da hızlandırır. Taşıma sırasındaki titreşimler, dağıtım sırasında plastik bileşenlerin mekanik bozulmasına katkıda bulunabilir. Ambalaj türündeki ve yeniden kullanım uygulamalarındaki farklılıklar da MP salınım seviyelerinde kritik bir rol oynamaktadır. Çalışmalar, iade edilebilir veya yeniden kullanılan PET şişelerin, tek kullanımlık şişelere göre önemli ölçüde daha fazla MP içerdiğini göstermiştir. Bu durum, temizlik ve taşıma işlemlerinden kaynaklanan kümülatif aşınmayı düşündürmektedir. Bulgular, şişelenmiş su üretimi ve ambalajlamasının

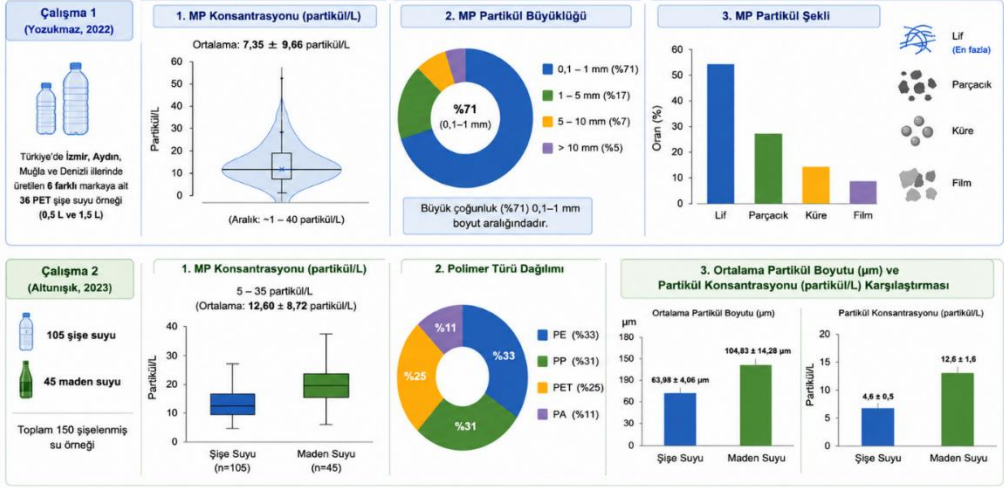
MP kontaminasyonuna önemli düzeyde etki ettiğini göstermektedir. Tüm bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, şişelenmiş sudaki MP'ler yalnızca çevresel maruziyetin bir sonucu olmaktan ziyade dolum proses aşamalarındaki plastik parçalar, malzeme bozulması ve sürtünme kaynaklı aşınma yoluyla sürekli olarak üretilmektedir (Pawak vd., 2026).

## **7. Türkiye’de İçme Sularında MNP ile ilgili Yapılan Çalışmalar**

Türkiye’de İzmir, Aydın, Muğla ve Denizli illerinde üretimleri yapılan 6 farklı ticari markaya ait, 0,5 ve 1,5 litre hacimlerinde olmak üzere toplam 36 adet tek kullanımlık (PET) şişe suyu örneğinin tamamında MP varlığı saptanmıştır. MP konsantrasyonu ortalama  $7,35 \pm 9,66$  partikül/L olarak belirlenmiş ve su örneklerinin büyük bir kısmında (%71) MP partikül büyüklüğü 0,1-1 mm arasında değişmiştir. En fazla bulunan MP şekli lif ve en fazla bulunan renk ise mavi olmuştur. Halk sağlığı risk değerlendirmesi için hesaplanan günlük alım (EDI) oranlarına göre en fazla etkilenen grubun 3-6 yaş arası grup olduğu (ortalama  $EDI=0,42$ ) tespit edilmiştir (Yozukmaz, 2022).

Türkiye’de yapılan başka bir çalışmada, farklı ticari firmalara ait 105’i şişe suyu ve 45’i maden suyu olmak üzere toplam 150 şişelenmiş su örneğinde 5-35 partikül/L arasında (ortalama  $12,60 \pm 8,72$  partikül/L) MP tespit edilmiştir. En fazla görülen polimer türleri PE (%33), PP (%31), PET (25%) ve PA (%11) olmuştur. Doğal şişe suları ile karşılaştırıldığında, maden sularının ortalama partikül büyüklüğü daha fazla ( $63,98 \pm 4,06$ ’e karşı  $104,83 \pm 14,28$   $\mu m$ ) ve partikül konsantrasyonu daha yüksek ( $4,6 \pm 0,5$ ’e karşı  $12,6 \pm 1,6$  partikül/L) bulunmuştur. Doğal sularda lif şeklindeki, maden sularında ise parçacık şeklindeki partiküller çoğunluğu oluşturmuştur. Tahmini günlük alım miktarları (EDI), şişelenmiş su tüketimiyle yetişkinler ve çocuklar için sırasıyla 0,019 ve 0,42 MP/kg/vücut ağırlığı/gün iken, maden suyu tüketimiyle sırasıyla 0,009 ve 0,04 MP/kg/vücut ağırlığı/gün olarak öngörülmüştür. Çalışmanın sonuçları, diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında, MP maruziyeti bakımından EDI ve yıllık alım miktarlarının (EAI) ihmal edilebilir düzeyde olduğunu göstermektedir (Altunışık, 2023). Şekil 7’de Türkiye’de şişelenmiş sularda MP Varlığı ve Maruziyete İlişkin bulgular verilmiştir.

## Şişelenmiş Sularda Mikroplastik (MP) Varlığı ve Maruziyetine İlişkin Bulgular



**Şekil .7.** Türkiye’de şişelenmiş sularda MP Varlığı ve Maruziyete İlişkin bulgular (Chatgpt’de hazırlanmıştır)

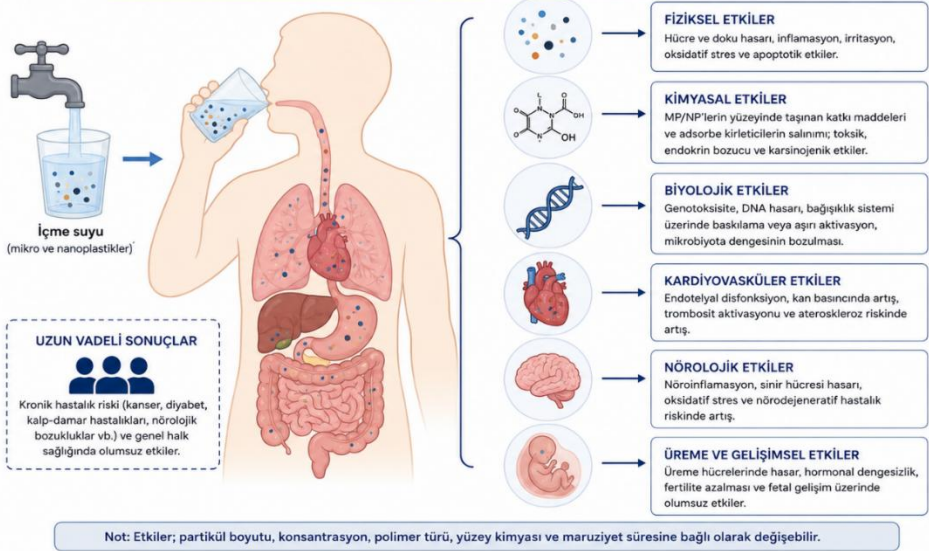
## 8. Mikro ve Nano Plastiklerin Sağlık Üzerindeki Etkileri

MNP’ler sahip oldukları yüzey enerjisi, elektriksel yükler ve belirli biyomoleküllere olan özgül afiniteleri gibi yüzey özellikleri nedeniyle proteinler ve lipidler gibi makromolekülleri çevredeki vücut sıvılarından adsorbe edebilme yeteneğine sahiptir. Diğer taraftan, yüksek miktarda reaktif yüzey grubu, çevredeki lipidleri ve proteinleri bozarak membran hasarına ve bozulmasına, dolayısıyla hemolitik semptomlara yol açabilmektedir. MNP yüzey yükü, katyonik parçacıkları değiştirebilir; bu da katyonik parçacıkların akciğerde daha yüksek oranda lokalize olmasına, hücre alımının artmasına ve akciğer toksisitesinin yükselmesine neden olabilmektedir. MNP’lerin sindirimi sonucu ortaya çıkan toksik etkiler, insanlarda çeşitli doku tiplerinde potansiyel DNA hasarına, genotoksisiteye ve birikime yol açabilmektedir. MNP polimerlerinin türü, boyutu, konsantrasyonu ve maruz kalma süresi, DNA hasarı ve genotoksisite değerlendirmesinde dikkate alınan belirleyici faktörler olarak değerlendirilmektedir (Lusher vd., 2015; Huang vd., 2022; Jones-Williams, vd., 2025; Alimba vd., 2026). Özellikle NP’ler çok küçük boyutları nedeniyle hücre zarları, dokular ve kan-beyin bariyeri gibi biyolojik bariyerleri MP’lere kıyasla daha kolay geçerek canlı organizmalar ve doğal yaşam için potansiyel bir risk oluşturmaktadır. MNP’lerin diğer zararlı kimyasal kirleticiler ve patojenler için taşıyıcı görevi yapmaları, toksikolojik etkilerinin daha da artmasına yol açabilmektedir (Pokhrel vd., 2026; Manono vd., 2026). Diğer taraftan NP partiküller, kökler ve potansiyel olarak yapraklar yoluyla bitkiler tarafından alınabilmektedir. Yenilebilir bitkisel ürünlerde birikime dair deneysel kanıtlar ile

meyve ve sebzelerde mikroplastiklere ilişkin raporlar, gıda güvenliği ve insan sağlığı açısından MNP'lerin endişe verici olduğunu ortaya koymaktadır (Kaya vd., 2026).

MNP'lerin musluk suları ve şişe suları gibi günlük tüketim maddelerinde giderek daha sık tespit edilmesi ve iç maruziyet ile biyolojik birikim potansiyelleri MNP'ler konusunda bir an önce önlem almayı gerektirmektedir. Yutma ve solunum, MNP'lere birincil maruz kalma yolu olarak kabul edilmekte olup bireylerin içme suyu yoluyla yılda 220.000 ila 1,2 milyon MNP partikülü yuttuğu tahmin edilmektedir (Manono vd., 2026). Yutulan MNP'lerin önemli bir kısmı dışkı yoluyla atılsa da, giderek artan kanıtlar MNP'lerin insan vücudunda kalıcı olabileceğini, biyolojik bariyerleri aşabileceğini ve birden fazla organ ve dokuda birikebileceğini göstermektedir. Sindirim sistemine girdikten sonra, özellikle 10 µm'den küçük MNP partikülleri, bağırsak bariyerini geçerek sistemik dolaşıma girebilir. Kan, akciğerler, karaciğer, pankreas, dalak, böbrekler, plesanta, kolon dokusu ve anne sütü, gibi çeşitli insan organlarında ve biyolojik sıvılarında MNP'lerin yaygın olarak bulunduğu, organlardaki dağılımları ve konsantrasyonlarında önemli farklılıklar olduğu ortaya konulmuştur. MNP'ler nörotoksiktir, bağırsak-beyin ekseni yoluyla beyne ulaşır, kan-beyin bariyerini aşar ve nörodejeneratif hastalıkları olumsuz etkileyebilir. Genel olarak, insan vücudundaki toplam MP yükünün 14.230 ile 17.091 partikül veya yaklaşık 37,26 ile 46,53 mg arasında olduğu tahmin edilmekte olup akciğerler birincil birikim bölgesidir. Organlar arası MP birikimindeki değişim, doku zarlarının geçirgenliği, temizlenme oranları ve çevresel maruz kalma arayüzlerine yakınlık dahil olmak üzere çeşitli biyolojik faktörlerden etkilenir. Çalışmalar, sağlık durumunun bozulmasının MP tutulumunu artırabileceğini göstermektedir. Örneğin, inflamatuvar bağırsak hastalığı olan bireylerin dışkılarında ve karaciğer rahatsızlığı olan hastaların karaciğerlerinde önemli ölçüde daha yüksek MP varlığı belirlenmiştir. Plasentada, göbek kordonu kanında ve mekonyum (yeni doğan bebeğin ilk dışkısı) örneklerinde MNP'lerin saptanması, bu parçacıkların anne-fetüs bariyerini aşabildiklerini göstermekte ve insan yaşamının erken döneminde MNP'lere maruz kalındığına işaret etmektedir (Demarquoy, 2026; Pawak vd., 2026; Bhatt vd., 2026; Khattri vd., 2026; Capuano vd., 2026; Sharma ve Sharma, 2026; Gonçalves vd., 2026; Song vd., 2026). İçme suyu yoluyla alınan MNP'lerin İnsan Sağlığı Üzerine Etkileri Şekil 8'de gösterilmiştir.

## İçme Suyu Yoluyla Mikro ve Nanoplastik Maruziyetinin İnsan Sağlığı Üzerindeki Potansiyel Etkileri



**Şekil.8.** İçme Suyu Yoluyla MNP Maruziyeti ve İnsan Sağlığı Üzerine Etkileri (Chatgpt’de hazırlanmıştır)

Cinsiyet ve anatomik faktörler de MP’lerin tutulumunu ve toksisitesini etkileyebilir. Örneğin, kadınların akciğerlerinin ve bağırsaklarının daha yüksek düzeyde MP birikim gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum muhtemelen daha dar hava yolları ve azalmış mukosilyer temizleme (mukusun taşınması yoluyla havayolunun yabancı mikroorganizmalardan ve bakterilerden temizlenme mekanizması) ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Bu tür biyolojik farklılıklar, davranışsal ve çevresel faktörlerle birleştiğinde, özellikle hamileler, bebekler ve bağışıklık sistemi zayıf olan kişiler gibi savunmasız bireyler için demografik özelliklere özgü risk değerlendirmelerinin gerekli olduğunu ortaya koymaktadır. İnsan dokularında MP varlığına dair artan kanıtlara rağmen, MP ve özellikle de NP boyutlarındaki küçük plastik partiküller için toksikolojik eşik değerlerin, referans dozların ve doz-yanıt ilişkilerinin henüz bulunmaması nedeniyle, sağlık riski değerlendirmesini yapmakta son derece sınırlıdır. Hijyenik bir alternatif olarak yaygın şekilde tüketilen şişelenmiş sular, özellikle depolama ve taşıma sırasında polimer bozunmasını hızlandıran sıcak iklimli bölgelerde, uzun vadeli iç plastik yüküne istemeden katkıda bulunabilir. Artan kanıtlar ışığında, MNP’lerin endişe verici yeni kirleticiler olarak resmen tanınması zorunlu hale gelmiştir. Bunun için MP’ler ve özellikle’de NP’lerin analizine yönelik uluslararası standart yöntemlerin ve limit değerlerin belirlenmesi son derece önemlidir. İçme suyu standartlarına da MNP eşik değerlerini dahil etmek için yasal düzenlemeler geliştirilmeli ve özellikle hassas gruplara ve kronik maruz kalma durumlarına özel önem verilmelidir. Ancak, metodolojik sınırlamalar ve plastik parçacıkların karmaşıklığı nedeniyle kesin doz-

yanıt ilişkileri ve insan güvenliği eşiklerinin belirlenmesi önemli bir zorluk olmaya devam etmektedir (Manono vd., 2026; Pawak vd., 2026).

## Sonuç

Elde edilen bilimsel veriler, MNP'lerin insan sağlığı ve doğal ekosistemler için ciddi bir tehdit haline geldiğini göstermektedir. Düzenli ve yüksek miktarda su tüketimi nedeniyle içme suları, diyet yoluyla MNP alımında başlıca maruziyet kaynaklarından biri olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle içme sularındaki MNP kontaminasyonu, son yıllarda küresel düzeyde ön plana çıkan çevre ve halk sağlığı sorunlarından biri olarak kabul edilmektedir. Su kaynaklarında ve gıda zincirinde MP partiküllerin varlığı yoğun bir şekilde çalışılmış ancak, boyutlarının çok küçük ve standart analiz yöntemlerinin sınırlı olması nedeniyle NP partiküller yeterince anlaşılamamış, sağlık üzerindeki etkilerine ait veriler sınırlı düzeyde kalmıştır. NP'lerin küçük boyutta olması, biyolojik bariyerleri kolayca geçerek dokulara girebilmeleri, hücreler ve bileşenleriyle kolayca etkileşime geçmeleri nedeniyle oldukça endişe verici gelişmeler olarak değerlendirilmektedir.

Arıtma tesislerinde kullanılan arıtma yöntemi, musluk sularındaki MP düzeyini etkilemektedir. Mikrofiltrasyon ve nano-filtrasyon gibi membran arıtma işlemlerinin konvansiyonel arıtmalara göre çok daha etkin olduğu ve MP partiküllerde %90-100 arasında arıtma sağladığı belirlenmiştir. NP partikülleri arıtma düzeyi ise henüz yeterince incelenmemiştir. Bu nedenle ortaya çıkan riskleri azaltmak için, içme suyu arıtma tesislerinde uygulanan proseslerin iyileştirilerek arıtmanın daha etkili bir şekilde yapılması gerekir. Arıtma sonrasında su dağıtım şebekesindeki plastik boruların aşınması da son derece önemlidir.

Şişelenmiş sulara ise musluk sularındaki gibi bir arıtma işlemi uygulanmamakta, kaynak su filtrasyon işleminden geçtikten sonra farklı boyutlardaki plastik veya cam şişelere dolum yapılmaktadır. Bu nedenle tek kullanımlık plastik (PET vb.) şişe sularındaki MNP kontaminasyonu (1) filtrasyon ile giderilemeyen kaynak suyunda mevcut kirlilikten, (2) şişenin gövdesindeki plastik polimerden ve şişe kapaklarından, (3) şişe dolum hattında mevcut plastik materyallerden (4) kullanım sırasında tekrarlanan açıp kapama işleminden, (5) şişe gövdesinin fiziksel baskıya maruz kalmasından, (6) şişenin sıcak/soğuk gibi dış etkilere maruz kalmasından kaynaklanmaktadır. Cam şişelerdeki içme sularında mevcut MNP kontaminasyonu da, kaynak suda mevcut kirlilik ve şişe dolum hatlarındaki plastik materyaller yanında şişe kapaklarındaki plastik materyalden ileri gelmektedir. Genelde, şişelenmiş sularda, belediyelerin arıtma tesislerinde arıtılmış musluk sularına göre daha yüksek düzeyde MNP konsantrasyonu belirlenmiş ve şişelenmiş su tüketiminin musluk suyuna kıyasla vücutta daha yüksek MNP yüküne yol açabileceği ileri sürülmüştür. Buna karşılık çok az sayıda yapılmış olan NP çalışmasında, içme sularında 106 düzeyinde NP partikül varlığının saptanması, gıdalarımızdaki yeni tehlike olarak kabul edilen MNP kirliliğinin boyutunu göstermektedir. MNP partiküllere maruz kalmayı en aza indirmek için şişelenmiş su tüketiminin



azaltılması da etkili bir strateji olarak kabul edilmektedir. MNP'lerin arıtılmış içme suları ve şişelenmiş sulardaki varlığı, mevcut pek çok su arıtma sisteminin verimliliğinin yetersiz kaldığını ve bu konudaki yasal düzenlemelerin güncellenmesinin gerekli olduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, arıtılmış içme suları ve şişelenmiş sularda MNP varlığının yaygın şekilde tespit edilmesi, mevcut su arıtma sistemlerinin bu kirleticilerin gideriminde tam anlamıyla yeterli olmadığını göstermektedir. Bu nedenle daha etkin arıtma teknolojilerinin geliştirilmesi, dağıtım sistemlerinin iyileştirilmesi, tek kullanımlık plastik ambalaj kullanımının azaltılması ve MNP'lere yönelik yasal düzenlemelerin güncellenmesi büyük önem taşımaktadır. Ayrıca özellikle nanoplastiklerin çevresel davranışları, biyolojik birikimleri ve insan sağlığı üzerindeki uzun dönem etkilerinin daha iyi anlaşılabilmesi için standartlaştırılmış analiz yöntemlerine dayalı kapsamlı araştırmalara ihtiyaç bulunmaktadır

## Kaynaklar

- Akarsu, C., Kideys, A. E., ve Kumbur, H. (2017). Eysel atık su arıtma tesislerinin sucul ekosisteme mikroplastik tehditi. *Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi*, 74(EK-1), 73-78. <https://izlik.org/JA24NU68DR>
- Alimba, C.G., Adesida, S.O., Owonikoko, W.M., ve Oteyola., A.O. (2026). Micro (Nano)plastics Vitation of Genetic Material: Systematic Review of Genotoxic Biomarkers and Model Bioindicators. *Journal of Applied Toxicology*, 46(1), 110–140. <https://doi.org/10.1002/jat.4928>
- Al-Mansoori, M., Stephenson, M., Harrad, S., ve Abdallah, M.A.E. (2025). Synthetic Microplastics in UK tap and bottled water; Implications for human exposure. *Emerging Contaminants*, 11(1), 100417. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2024.100417>
- Altunışık, A. (2023). Microplastic pollution and human risk assessment in Turkish bottled natural and mineral waters. *Environmental Science and Pollution Research*, 30:39815–39825. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-25054-6>
- Andrady, L.A. (2017). The plastic in microplastics: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 19(1), 12-22. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.082>
- Arı, B., Sodre, M.F., Önal, U. ve Şahiner, N. (2025). An overview of the sources, hazards and removal of microplastics. *Journal of Macromolecular Science*, 62(12), 1067-1083. <https://doi.org/10.1080/10601325.2025.2583247>
- Aves, A. R., Revell, L. E., Gaw, S., Ruffell, H., Schuddeboom, A., Wotherspoon, N. E., LaRue, M., ve McDonald, A. J. (2022). First evidence of microplastics in Antarctic snow. *The Cryosphere*, 16:2127–2145. <https://doi.org/10.5194/tc-16-2127-2022>
- Barbier, J.S., Dris, R., Lecarpentier, C., Raymond, V., Delabre, K., Thibert, S., Tassin, B., ve Gasperi, J. (2022). Microplastic occurrence after conventional and nanofiltration processes at drinking water treatment plants: preliminary results, *Frontiers in Water*, 4:886703. <https://doi.org/10.3389/frwa.2022.886703>
- Başaran, B., Özçifçi, Z., Kanbur, E.D., Akçay, H.T., Gül, S., Bektaş, Y., ve Aytan, Ü. (2024). Microplastics in honey from Türkiye: Occurrence, characteristic, human exposure, and risk assessment. *Journal of Food Composition and Analysis*, 135:106646. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106646>
- Belanger, R. M., ve Storks, L. (2026). Neurophysiological and Behavioral Effects of Micro- and Nanoplastics in Aquatic Organisms. *Animals*, 16(6), 941. <https://doi.org/10.3390/ani16060941>
- Bhatt, A.H., Nimbalkar, S.M., Patel, D.V., ve Pujara, R.K. (2026). Microplastics exposure during perinatal period: Impacts on neonatal immune and metabolic programming - a scoping review. *Journal of Perinatology*. <https://doi.org/10.1038/s41372-026-02571-7>

- Bhattacharya, S., ve Rajaram, R. (2026). Ecotoxicological and Health Impacts of Micro- and Nanoplastics. In *Microplastics and Nanoplastics in Aquatic Environments* [Working Title]. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1013839>
- Binelli, A., Cappelletti, A., Cremonesi, C., Della Torre, C., Caorsi, G., ve Magni, S. (2026). From Aquifer to Tap: Comprehensive Quali-Quantitative Evaluation of Plastic Particles Along a Drinking Water Supply Chain of Milan (Northern Italy). *Journal of Xenobiotics*, 16(1), 18. <https://doi.org/10.3390/jox16010018>
- Calikanzaros, E., Donat-Vargas, C., Chevance, G., Tonne, C., Boleda, M.R., Dalmau, J., Borrel, X., Mazigh, R., Llorca, M., Farre, M., ve Villanueva, C.M. (2026). Micro- and nanoplastics in biological samples following a drinking water intervention in Barcelona, Spain. *PLOS Water* 5(1): e0000469. <https://doi.org/10.1371/journal.pwat.0000469>
- Camilleri, J., Agius Anastasi, A., ve Briffa, S. M. (2025). Detection, Quantification, and Characterisation of Microplastics in Maltese Bottled Water. *Microplastics*, 4(4), 88. <https://doi.org/10.3390/microplastics4040088>
- Capodaglio, A. G. (2025). Micro- and Nano-Plastics in Drinking Water: Threat or Hype? Critical State-of-the-Art Analysis of Risks and Approaches. *Journal of Xenobiotics*, 15(3), 85. <https://doi.org/10.3390/jox15030085>
- Capuano, N., Lombardi, M., Cafà, N., Marino, M., Salzano, F., Scalia, F., Marfella, R., Villone, G., Cappello, F., Szychlinska, M. A., Franci, G., Santoro, A., ve Rinaldi, L. (2026). Micro- and Nanoplastics as Disruptors of Digestive and Hepatopancreatic Homeostasis: Insights into the Plastic-Gut-Liver Axis. *International Journal of Molecular Sciences*, 27(7), 3272. <https://doi.org/10.3390/ijms27073272>
- Carpenter, E.J., ve Smith Jr, K.L. (1972). Plastics on the Sargasso Sea surface. *Science*, 175(4027), 1240-1241. <https://doi.org/10.1126/science.175.4027.1240>
- Chandra, S., ve Walsh, K.B. (2024). Microplastics in water: Occurrence, fate and removal. *Journal of Contaminant Hydrology*, 264:104360. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2024.104360>
- Chiavarini, S., Manzo, S., Accardo, S., Ansanelli, G., ve Schiavo, S. (2026). Chapter 11: The hidden threat posed by micro(nano)plastics leaching chemicals. Editor(s): Chandrasekaran, N., Marcos, R. & Sonia Manzo. *Micronanoplastics: From Source to Sink*, Elsevier, Pages 245-255, <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-24782-8.00010-8>
- Cox, K.D., Covernton, G.A., Davies, H.L., Dower, J.F., Juanes, F. ve Dudas, S.E. (2019). Human Consumption of Microplastics. *Environmental Science & Technology*, 53(12), 7068-7074. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01517>
- Cverenkárová, K., Valachovičová, M., Mackuľák, T., Žemlička, L., ve Bírošová, L. (2021). Microplastics in the Food Chain. *Life*, 11(12), 1349. <https://doi.org/10.3390/life11121349>

- Dalla Fontana, G., Lamprillo, D., Dotti, F., Ferri, A., Foccardi, T., ve Mossotti, R. (2026). Quantification of Microplastics in Treated Drinking Water Using  $\mu$ -FT-IR Spectroscopy: A Case Study from Northeast Italy. *Microplastics*, 5(1), 23. <https://doi.org/10.3390/microplastics5010023>
- Dalu, T., Xozumti, A.P., Dalu, M.T.B., Munyai, L.F., Nkosi, S.M., Themba, S.T., Mudzielwana, R., ve Mpopetsi, P.P. (2025). Microplastics in municipal water: analysing variations in contamination in a Lowveld city, South Africa. *Discover Sustainability*, 6:850. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01690-z>
- Demarquoy, J. (2026). Effects of micro and nano plastics on renal health. *World Journal of Nephrology*, 15(1), 115039. <https://dx.doi.org/10.5527/wjn.v15.i1.115039>
- Egbueri, J.C., Usman, A.G., Abba, S.I., Arunachalam, K.P., ve Agbasi, J.C. (2026). Global overview of uncommon microplastics in treated and bottled waters: Comparative analysis of their abundance, characteristics, emerging challenges, and future direction. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 14:121431. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2026.121431>
- Gambino, I., Bagordo, F., Grassi, T., Panico, A., ve De Donno, A. (2022). Occurrence of Microplastics in Tap and Bottled Water: Current Knowledge. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(9), 5283. <https://doi.org/10.3390/ijerph19095283>
- Gonçalves, J., Pequeno, J., Krzysnik, D., Sobral, P., ve Antunes, J. (2026). Nanoplastics: An Emerging Threat to Human Health—A Perspective Review. *Pollutants*, 6(2), 21. <https://doi.org/10.3390/pollutants6020021>
- Grasso, G., Foglia, S., Zane, D., Brunetti, B., ve Dragone, R. (2025). Micro(nano)plastics cycle in ruminant farming systems. *Progress in Environmental Chemistry*, 1(1), 63. <https://doi.org/10.65746/pec63>
- Hale, R. C., Seeley, M. E., La Guardia, M. J., Mai, L., ve Zeng, E. Y. (2020). A Global Perspective on Microplastics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125: e2018JC014719. <https://doi.org/10.1029/2018JC014719>
- Hart, M.N.J. ve Lenhart, J.J. (2026). What's in your water? A comparative analysis of micro- and nanoplastics in treated drinking water and bottled water. *Science of The Total Environment*, 1011:181148. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.181148>
- Heo, S. J., Moon, N., ve Kim, J. H. (2025). A systematic review and quality assessment of estimated daily intake of microplastics through food. *Reviews on Environmental Health*, 40(2), 371-392. <https://doi.org/10.1515/reveh-2024-0111>
- Herrera, A.V., Llorca, M., Diaz, X.B., Hasselerharm, P.E.R., Abad, E., Villanueva, C.M., ve Farré, M. (2022). Polymers of micro(nano) plastic in household tap water of the Barcelona Metropolitan Area. *Water Research*, 220:118645. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118645>

- Herrera, A.V., Torné, M.G., Diaz, X.B., Abad, E., Llorca, M., Villanueva, C.M., ve Farré, M. (2023). Exposure to micro(nano)plastics polymers in water stored in single-use plastic bottles. *Chemosphere*, 343:140106. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140106>
- Huang, Y., Wong, K.K., Li, W., Zhao, H., Wang, T., Stanescu, S., Boulton, S., van Dongen, B., Mativenga, P., ve Lin Li, L. (2022). Characteristics of nano-plastics in bottled drinking water. *Journal of Hazardous Materials*, 424:127404. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127404>
- Huntington, A., Corcoran, P.L., Jantunen, L., Thaysen, C., Bernstein, S., Stern, G.A., ve Rochman, C.M. (2020). A first assessment of microplastics and other anthropogenic particles in Hudson Bay and the surrounding eastern Canadian Arctic waters of Nunavut. *Facets*, 5(1), 432-454. <https://doi.org/10.1139/facets-2019-0042>
- Hussain, K.A., Dong, H., Aguilar, A.T., Kim, S., Pena, C.A.G., Foss, S., Ballester, L.F., Lu, Y., ve Li, Y. (2026). Everyday storage and handling of PET bottled water increase human exposure to nano- and microplastics: Influence of socio-economic factors. *Water Research*, 295:125569. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2026.125569>
- Iñiguez, M.E., Conesa, J.A. ve Fullana, A. (2017). Microplastics in Spanish Table Salt. *Scientific Reports*, 7:8620. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09128-x>
- Jones-Williams, K., Rowlands, E., Primpke, S., Galloway, T., Cole, M., Waluda, C., ve Manno, C. (2025). Microplastics in Antarctica - A plastic legacy in the Antarctic snow? *Science of The Total Environment*, 966:178543. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178543>
- Jung, J.W., Kim, S., Kim, Y.S., Jeong, S., ve Lee, J. (2022). Tracing microplastics from raw water to drinking water treatment plants in Busan, South Korea. *Science of The Total Environment*, 825:154015. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154015>
- Junior, W.J.F.L., ve Moreno-Arribas, M.V. (2026). Micro- and nanoplastics, metagenomics, and food systems: toward an integrated perspective. *Current Opinion in Food Science*, 68:101379. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2026.101379>
- Kanhai, La D.K., Gårdfeldt, K., Lyashevskaa, O., Hassellövd, M., Thompsonb, R.C., ve O'Connor, I. (2018). Microplastics in sub-surface waters of the Arctic Central Basin. *Marine Pollution Bulletin*, 130:8-18. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.03.011>
- Kankanige, D. ve Sandhya Babel, S. (2020). Smaller-sized micro-plastics (MPs) contamination in single-use PET-bottled water in Thailand. *Science of The Total Environment*, 717:137232. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137232>

- Kargar, M., Hamidian, A. H., ve Rajeswari, I. T. (2026). Nanoplastics toxicity in aquatic organisms: a review of effects on selected marine and freshwater species. *Nanotoxicology*, 20(1–2), 18–43. <https://doi.org/10.1080/17435390.2025.2611103>
- Kaya, C., Ashraf, A., Sarkar, B., Bolan, N., Rinklebe, J. ve Ahmad, P. (2026). Nanoplastics in soil and aquatic ecosystems: Sources, impacts, and nature-based remediation strategies. *Environmental Pollution*, 395:127723. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2026.127723>
- Kazancı, Y., Alpergün, C., Kara, N., Alyörük, N., Gündüz, O., ve Baycan, N. (2023). Bir nehir su kütlesinin mikroplastikler açısından çevresel değerlendirilmesi: Matematiksel Modelleme Yaklaşımı. *HİDRO'2023: Ulusal Hidrojeoloji ve Su Kaynakları Sempozyumu*, 25-27 Mayıs, KTÜ, Trabzon.
- Khattari, V., Giri, A., Goel, F., Bhange, M., Singh, A.K., Rai, S.N., ve Yadav, D.K. (2026). Brain under siege: the role of micro and nanoplastics in neuroinflammation and oxidative stress. *3 Biotech* 16:108. <https://doi.org/10.1007/s13205-026-04722-1>
- Kirstein, I.W., Gomiero, A., ve Vollertsen, J. (2021). Microplastic pollution in drinking water. *Current Opinion in Toxicology*, 28:70-75. <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2021.09.003>
- Kochanek, A., Graż, K., Potok, H., Gronba-Chyła, A., Kwaśny, J., Wiewiórska, I., Ciula, J., Basta, E., ve Łapiński, J. (2025). Micro- and Nanoplastics in the Environment: Current State of Research, Sources of Origin, Health Risks, and Regulations—A Comprehensive Review. *Toxics*, 13(7), 564. <https://doi.org/10.3390/toxics13070564>
- Koelmans, A.A., Nor, N.H.M., Hermesen, E., Kooi, M., Mintening, S.M., ve De France, J. (2019). Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment of data quality. *Water Research*, 155:410-422. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.02.054>
- Lee, H., Kunz, A., Shim, W.J., ve Walther, B.A. (2019). Microplastic contamination of table salts from Taiwan, including a global review. *Scientific Reports*, 9:10145. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46417-z>
- Li, H., ZHU, L., Ma, M., Wu, H., An, L., ve Yang, Z. (2023). Occurrence of microplastics in commercially sold bottled water. *Science of The Total Environment*, 867:161553. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161553>
- Liu, X., Wei, W., Chen, Z., Wu, L., Duan, H., Zheng, M., Wang, D., ve Ni, B.J. (2025). The threats of micro- and nanoplastics to aquatic ecosystems and water health. *Nature Water* 3:764–781. <https://doi.org/10.1038/s44221-025-00464-1>
- Lozoya, J.P., Lacerot, G., De Feo, B., Krojmal, E., González-Pleiter, M., Ramos, A., ve de Mello, F.T. (2024). Challenges in Studying Plastics and Microplastics in Antarctica: Considerations from the Antarplast Project. *Antarctic Affairs*, 10:17-29. ISSN 2451- 5736

- Lusher, A., Tirelli, V., O'Connor, I., ve Officer, R. (2015). Microplastics in Arctic polar waters: the first reported values of particles in surface and sub-surface samples. *Scientific Reports*, 5:14947. <https://doi.org/10.1038/srep14947>
- Manono, B. O., Gichana, Z., Theuri, A., ve Kithaka, K. M. (2026). Nano- and Microplastics in Single-Use Plastic Water Bottles: A Review of Occurrence, Health Risks, and Regulatory Needs. *Pollutants*, 6(1), 15. <https://doi.org/10.3390/pollutants6010015>
- Mason, S.A., Welch, V.G. ve Neratko, J. (2018). Synthetic Polymer Contamination in Bottled Water. *Frontiers in Chemistry*, 6:407. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00407>
- Molina, E., ve Benedé, S. (2022). Is There Evidence of Health Risks From Exposure to Micro- and Nanoplastics in Foods?. *Frontiers in Nutrition*, 9:910094. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.910094>
- Mu, J., Zhanga, S., Qua, L., Jina, F., Fangc, C., Maa, X., Zhanga, W., ve Wang, J. (2019). Microplastics abundance and characteristics in surface waters from the Northwest Pacific, the Bering Sea, and the Chukchi Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 143:58-65. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.04.023>
- Njema, G.G., Agoro, M.A. ve Kibet, J.K. (2026). A Critical Evaluation of Nano- and Microplastics: Sources, Health Risks, and Mitigation Strategies. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2026:1357400. <https://doi.org/10.1155/amse/1357400>
- Pawak, V.S., Loganathan, V.A., ve Sabapathy, M. (2026). Microplastics (<40  $\mu\text{m}$ ) in commercial bottled drinking water from India: Advanced spectroscopic characterization, source attribution and human exposure risk. *Results in Engineering*, 30:109954. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.109954>
- Pellegrino, D., La Russa, D., ve Barberio, L. (2025). Pollution Has No Borders: Microplastics in Antarctica. *Environments*, 12(3), 77. <https://doi.org/10.3390/environments12030077>
- Pham, V.T., Do, V.M., Le, T.X.T., Duong, T.M., Trinh, M.V., Pham, V., Le, T.T.A., ve Vu, T.T.H. (2026). Characterization of Microplastics in Household Tap Water in Vietnam's Rural Areas: A Preliminary Study in the Red River Delta Region. *CLEAN – Soil, Air, Water*, 54 (2) e70110. <https://doi.org/10.1002/clen.70110>
- Pivokonsky, M., Cermakova, L., Novotna, K., Peer, P., Cajthaml, T., ve Janda, V. (2018). Occurrence of microplastics in raw and treated drinking water, *Science of The Total Environment*. 643: 1644–1651. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.102>
- Pokhrel, A., Islam, M.A. ve Mitra, S. (2026). Aggregation dynamics of nanoplastics: insights through real world waste. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 28(2), 384-391. <https://doi.org/10.1039/d5em00760g>

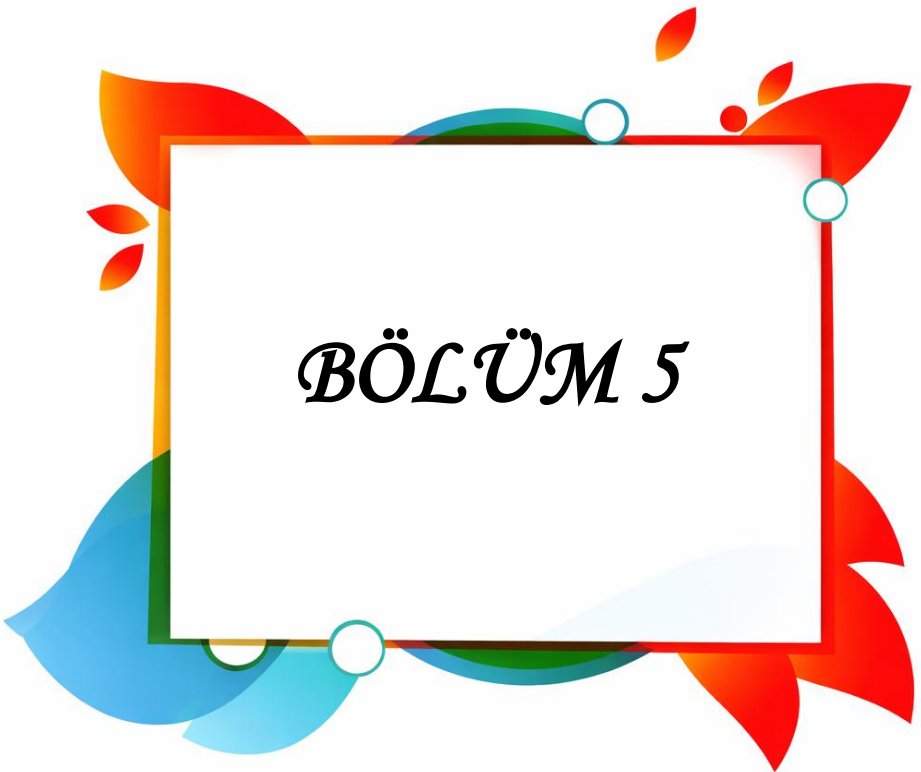
- Pompermayer, L. L. de O., de Santos, A.D.O., da Cunha, D.L., Junior, J. de M., Vieira, K.S., Carvalho, D.G., ve Gaylarde, C.C. (2026). A Global Review of Microplastic Contamination in Groundwater: Empirical Evidence and Latin American Perspectives. *Water and Environment Journal*, 1–10. <https://doi.org/10.1111/wej.70042>
- Prasertboonyai, K., Muenmee, S., Chouychai, B., ve Hongsawa, P. (2025). Abundance, characteristics, and potential human intake of microplastic contamination in tap water: A study of water supply treatment plants in Rayong Province, Thailand. *Journal of Water Process Engineering*, 72:107460. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107460>
- Qian, N., Gao, X., Xiaoqi, L., Deng, H., Bratu, T.M., Chen, Q., Stapleton, P., Yan, B.Z. ve Min, W. (2024). Rapid single-particle chemical imaging of nanoplastics by SRSmicroscopy. *PNAS*, 121(3), e2300582121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2300582121>
- Rangari, G. H., Lade, A.D., ve Ghare, A.D. (2026). A Comprehensive Review of MP Pollution in Global Rivers: Distribution Patterns and Fluvial Transport Dynamics. *Water Environment Research*, 98(2), e70294. <https://doi.org/10.1002/wer.70294>
- Rawat, V., Sharma, S., Kumar, A., ve Paul, V. (2026). A Critical Review on Analytical Techniques for Microplastics in Food Commodities. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 1–15. <https://doi.org/10.1080/10408347.2026.2658851>
- Rota, E., Bergami, E., Corsi, I., ve Bargagli, R. (2022). Macro- and Microplastics in the Antarctic Environment: Ongoing Assessment and Perspectives. *Environments*, 9(7), 93. <https://doi.org/10.3390/environments9070093>
- Samandra, S., Mescall, O.J., Plaisted, K., Symons, B., Xie, S., Ellis, A.V., ve Clarke, B.O. (2022). Assessing exposure of the Australian population to microplastics through bottled water consumption. *Science of The Total Environment*, 837:155329. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155329>
- Sforzi, L., Sarti, C., Scopetani, C., Ciattini, S., Chelazzi, D., Martellini, T., ve Cincinelli, A. (2026). Drinking or not drinking: Microplastic contamination in single-use water containers. *Journal of Food Composition and Analysis*, 149:108603. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.108603>
- Sharma, Y.D., ve Sharma, A. (2026). Molecular insights into physiological impact of micro- and nano-plastics on the digestive system and gut-brain axis. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 304:110473. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2026.110473>
- Shi, K., Okoffo, E.D., Jiang, J., Rauert, C., ve Thoman, K.V. (2026). Detection and Quantification of Nanoplastics and Microplastics in Australian Drinking Water. *ACS EST Water*, <https://doi.org/10.1021/acsestwater.5c01404>



- Shruti, V.C., Guevara, F.P., Martínez, I.E., ve Muniasamy, G.K. (2021). Toward a unified framework for investigating micro(nano)plastics in packaged beverages intended for human consumption. *Environmental Pollution*, 268:115811. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115811>
- Singh, S., Trushna, T., Kalyanasundaram, M., Tamhankar, A.J., ve Diwan, V. (2022). Microplastics in drinking water: a macro issue. *Water Supply*, 22(5), 5650. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.189>
- Soininen, T., Soinine, T., Uurasjarvi, E., Hamalainen, L., Huusari, N., Feodoroff, J., Moshnikoff, J., Niiranen, E., Feodoroff, P., Mustonen, T., ve Koistinen, A. (2024). Microplastics in Arctic waters of the Finnish Sámi area. *Science of The Total Environment*, 940:173666. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173666>
- Song, K., Ding, R., Sun, C., Yao, L., ve Zhang, W. (2021). Microparticles and microplastics released from daily use of plastic feeding and water bottles and plastic injectors: potential risks to infants and children in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 28:59813–59820. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14939-7>
- Song, X., Chen, Q., Rao, F., Wang, C., Du, L., Wu, J., Guo, W., Yang, L., Li, L., Zeng, L., Yuan, C., Liu, Y., ve Feng, X. (2026). Associations between prenatal exposure to micro(nano)plastics and neonatal lipid profile. *Environmental Science Nano*, 13:925-937. <https://doi.org/10.1039/d5en00898k>
- Soudavari, A., Barari, F., Ehsani, E., Bonyadi, Z., ve Davoudi, M. (2025). Occurrence and health risk assessment of microplastics in beverages and ice packs. *Scientific reports*, 15:23584. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-08821-6>
- Świetlik, J., ve Magnucka, M. (2025). Aging of drinking water transmission pipes during long-term operation as a potential source of nano- and microplastics. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 263:114467. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2024.114467>
- Tirkey, A., ve Upadhyay, S.B. (2021). Microplastics: An overview on separation, identification and characterization of microplastics. *Marine Pollution Bulletin*, 170(2021),112604. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112604>
- Tong, H., Jiang, Q., Hu, X., ve Zhong, X. (2020). Occurrence and identification of microplastics in tap water from China. *Chemosphere*, 252:126493. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126493>
- Van Cauwenberghe, L., ve Janssen, C.R. (2014). Microplastics in bivalves cultured for human consumption. *Environmental Pollution*, 193:65–70. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.06.010>
- Wang, Z., Lin, T., ve Chen, W. (2020). Occurrence and removal of microplastics in an advanced drinking water treatment plant (ADWTP). *Science of The Total Environment*, 700:134520. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134520>

- Wang, J., Xie, L.G., Wu, X., Zhao, Z., Yang, H.Y., ve Sun, H.M. (2024). Identification and quantification of micro–nano-plastics in polypropylene-bottled injections. *Heliyon*, 10:e35101. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35101>
- Walker, T.R., Hofmann, T. ve Singh, N. (2026). Chapter 1: Understanding Microplastics and Nanoplastics as Conventional and Emerging Contaminants in the Environment, ed. N. Singh, T. R. Walker, and T. Hofmann, Royal Society of Chemistry, vol. 18, ch. 1, pp. 1-14. <https://doi.org/10.1039/9781837678235-00001>
- Wang, Z., Pileczi, A. ve Ariya, P.A. (2026). Waterborne nanoplastics and microplastics: analytical advances, modelling, and future directions. *Environmental Science:Nano*, 13:1776-1802. <https://doi.org/10.1039/d5en01084e>
- Wen, S., Zhao, Y., Wang, M., Yuan, H., ve Xu, H. (2024). Micro(nano)plastics in food system: potential health impacts on human intestinal system. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(5), 1429–1447. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2116559>
- Winkler, A., Fumagalli, F., Cella, C., Gilliland, D., Tremolada, P. ve Valsesia, A. (2022). Detection and formation mechanisms of secondary nanoplastic released from drinking water bottles. *Water Research*, 222:118848. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118848>
- Xiong, S., Bai, G., Shen, X., ve Zhou, Y. (2025). On microplastics abundance in waters of Guizhou, China. *Journal of Oceanology and Limnology*, 43:383–395. <https://doi.org/10.1007/s00343-025-4207-0>
- Yozukmaz, A. (2022). Detection and public health risk assessment of microplastics in disposable (PET) bottled water produced and sold locally in the Aegean Region. *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 39(4), 275-283. <https://doi.org/10.12714/egejfas.39.4.02>
- Zhang, Q., Xu, E.G., Li, J., Chen, Q., Ma, L., Zeng, E.Y., ve Shi, H. (2020). A Review of Microplastics in Table Salt, Drinking Water, and Air: Direct Human Exposure. *Environmental Science & Technology*, 54 (7), 3740-3751. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04535>
- Zhao, S., Kvale, K.F., Zhu, L., Zettler, E.R., Egger, M., Mincer, T.J., Zettler, L.A.A., Lebroton, L., Niemann, N., Nakajima, R., Thiel, M., Bos, R.P., Galgani, L., ve Stubbins, A. (2025). The distribution of subsurface microplastics in the ocean. *Nature*, 641:51–61. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08818-1>





## *BÖLÜM 5*

# Et Teknolojisinde Diyet Lifin Önemi

*Fadime Bayram<sup>1</sup> & Sümeyra Sultan Tiske İnan<sup>2</sup>*

## GİRİŞ

Et teknolojisi, gıda sektöründe hızla gelişen ve tüketici beklentilerine bağlı olarak yenilikçi yaklaşımların ön plana çıktığı bir alandır. Günümüzde sağlıklı beslenme bilincinin artmasıyla birlikte, düşük yağ ve tuz içeriğine sahip, fonksiyonel bileşenlerle zenginleştirilmiş et ürünlerine olan talep giderek yükselmektedir. Bu doğrultuda, et ürünlerinde yağ içeriğini azaltmak, fonksiyonel bileşenler eklemek, doğal katkı maddeleri kullanmak ve gıda atıklarını değerlendirmek gibi konular büyük önem taşımaktadır. Aynı zamanda, diyet liflerin et ürünlerine entegrasyonu, hem besin değeri hem de teknoloji açısından avantajlar sunarak yeni nesil sağlıklı ürünlerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır (Serdaroğlu ve İpek, 2019; Köksal ve Özel, 2008; Fernández-López, 2021).

Et, mikrobiyolojik açıdan bozulmaya yatkın bir gıda maddesidir. Et ve et ürünlerinde meydana gelen bozulmaların temelinde oksidatif reaksiyonlar yer almakta olup, bu süreç tat, renk ve koku değişikliklerine yol açmaktadır (Tiske İnan, 2014; Fernandez ve ark., 1997; Decker ve ark., 1993). Günümüzde tüketici tercihlerinin değişmesi ve et ürünlerinin raf ömrünün uzatılmasına yönelik çalışmaların artmasıyla birlikte, oksidatif stabiliteyi artırma ve gıda atığını aza indirmek amacıyla doğal antioksidanların kullanımı yaygınlaşmıştır. Fenolik bileşikler, doğal antioksidanlar arasında en dikkat çeken grubu oluşturmaktadır (Şimşek & Kılıç, 2012). Bitkilerin yaprak, kök, gövde, meyve, tohum ve kabuk gibi çeşitli kısımlarından elde edilen ekstraktlar, tozlar, un ve posalar et ürünlerinde antioksidan kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Bu bileşenlerin başta lipitler olmak üzere protein ve renk pigmentlerinin oksidasyonunu geciktirdiği, böylece ürünün renk, tekstür ve tat özelliklerini koruyarak raf ömrünü uzattığı belirlenmiştir (Çevik Özkır, 2021). Dünya genelinde et ve et ürünleri üretiminde temel hedef; hijyenik koşullarda üretim gerçekleştirmek, ürünün kalitesini ve saklama süresini uzatmak, insan sağlığına fayda sağlayacak özellikler kazandırmak ve sağlıklı ilgili olası riskleri en aza indirmektir (Çelik, 2012).

Formülasyon denemeleri, yeni et ürünlerinin geliştirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu denemeler, ürünün dokusu, su tutma kapasitesi, raf ömrü ve

<sup>1</sup> Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Karaman. 0009-0005-4765-6407

<sup>2</sup> Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Karaman. 0000-0002-2686-9447

besin değerleri gibi özelliklerde yapılacak değişikliklerin etkilerini belirlemek amacıyla; yeni bileşenlerin uyumluluğunu test etmek, organoleptik özellikleri (tat, doku, koku) iyileştirmek ve mikrobiyal stabiliteyi sağlamak için uygulanmaktadır. Özellikle bu yaklaşım hem orijinal lezzetin korunmasına hem de sağlık açısından avantajlı ürünlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır (Serdaroğlu & İpek, 2019).

Son yıllarda sürdürülebilirlik anlayışı doğrultusunda, gıda atıklarının değerlendirilmesi de et ürünleri üretiminde dikkat çeken konular arasında yer almaktadır. Meyve ve sebze işleme atıkları, özellikle diyet lifi açısından zengin olan elma, nar, havuç ve üzüm posaları gibi bileşenler, et ürünlerinde besleyici değeri artırmak ve teknolojik faydalar sağlamak amacıyla kullanılmaktadır (Bilek ve ark., 2019). Bu bağlamda, tarımsal atıkların değerlendirilmesi hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemli fırsatlar sunmaktadır (Bilek ve ark., 2019).

## **DİYET LİFİ**

Diyet lifi, insan vücudu tarafından sindirilemeyen ancak mikroorganizmalar tarafından fermente edilebilen, yüksek su tutma kapasitesine sahip ve mide ile bağırsakta tokluk hissi yaratan, aynı zamanda kalın bağırsakta toksik maddelerin yoğunluğunu azaltarak kolon sağlığını iyileştiren, bitkilerin hücre duvarlarını oluşturan bileşiklerdir (Salçın & Erçoşkun, 2003; Yağlı, 2013)..

Diyet lifinin doğru tanımı son birkaç yıldır yoğun bir şekilde tartışılmaktadır. Tartışma, 3 ila 9 manometrik üniteye (M) sahip bir tür dirençli karbonhidrat olan oligosakkaritlere odaklanmıştır (FAO/WHO, 2010). Diyet lifi, insan sindirim sisteminde endojen enzimler tarafından hidrolize edilemeyen ve on veya daha fazla monomerik üniteye (M) sahip karbonhidrat polimerleri olarak da tanımlanmaktadır (Codex Alimentarius, 2021). Ancak, daha sonraki araştırmalar benzer monosakkaritler içeren sindirilemeyen oligosakkaritlerin ve polisakkaritlerin homojen fermentasyonunu ve fizyolojik aktivitelerini gözlemleyerek oligosakkaritlerin bir tür diyet lifi olduğu yönünde destekleyici kanıtlar ileri sürmüştür (de Menezes ve ark., 2013). Çin, Japonya, Amerika Birleşik Devletleri, Kanada, Brezilya ve Fransa ile Avrupa Birliği dahil olmak üzere birçok ülke, oligosakkaritlerin resmi kılavuzlarında veya standartlarında diyet lifi olarak dahil edildiği görülmüştür (Dai & Chau, 2017; Stephen ve ark., 2017).

Diyet lifi MU polimerizasyonunun fizyolojik özelliklerine göre üç tre ayrılabilir:

- 1) nişasta olmayan polisakkaritler (NSP'ler) ( $MU \geq 10$ ),
- 2) dirençli nişastalar (RS) ( $MU \geq 10$ ) ve
- 3) dirençli/sindirilemeyen oligosakkaritler ( $MU: 3-9$ ) (Rezende ve ark., 2021).

NSP'ler esas olarak selüloz, hemiselüloz, pektinler, insülin ve çeşitli hidrokoloidleri içermektedir (Kumar ve ark., 2012; Tungland & Meyer, 2002). İnsülin, 2-60 fruktoz ünitesi içeren bir fruktandır (Roberfroid, 2007). RS, öğütülmüş tahıllar ve tohumlardan (RS 1), çiğ patateslerden, mısırdan ve yeşil muzlardan (RS 2), pişirilmiş ve soğutulmuş patates ve mısır gevreklerinden (RS 3), unlu mamullerden (RS 4) ve kızarmış pirinç cipslerinden (RS 5) türetilen RS 1 ila RS 5 olarak daha da sınıflandırılabilir (Raigond ve ark., 2015). Oligosakkaritlerin diyet lifi olarak tanınması, insanların erişebildiği sağlıklı sindirilemeyen karbonhidratların yelpazesini büyük ölçüde genişletir. Bu, sürdürülebilir beslenme takibi ölçümlerin doğruluğunu geliştirme noktasında yardım sağlayabilir (Miller, 2020) ve sağlık için doğal veya yapay olarak lif kaynağı gıdaların alımını teşvik edebilir (Jones, 2014).

Diyet lifleri suda çözünen ve suda çözünmeyen olmak üzere iki temel grupta ele alınmaktadır (Çizelge 1). Çözünür lifler; elma, ayva gibi meyvelerde bulunan pektin, reçinede bulunan gamlar,  $\beta$ -glukan yapısındaki polisakkaritler, yulaf gibi tahıllarda bulunan musilajlar ve suda çözünebilir pentozanları kapsamaktadır (Selani ve ark., 2016). Çözünür lifler, suyu bağlama özellikleri sayesinde jel oluşturup yoğun bir yapı meydana getirerek, kandaki kolesterol seviyesini düşürmek ve bağırsaktaki glikoz emilimini azaltmak gibi önemli işlevler üstlenmektedirler (Lin ve ark., 2019). Öte yandan, çözünmez lifler arasında selüloz, hemiselüloz, lignin ve suda çözünmeyen pentozanlar yer almaktadır. Bu tür lifler, ağırlıklarının 20 katı kadar su tutma kapasitesine sahiptir ve dışkı hacmini artırarak bağırsak geçiş süresini kısaltmakta, böylece kabızlığın önlenmesine katkıda bulunmaktadır (Borderias ve ark., 2005; Yalınkılıç ve ark., 2012).

**Çizelge 1.** Diyet lifin sınıflandırılması (Fu ve ark., 2022)

| Diyet Lifi Çeşidi                |                              | Kaynak                                                                      |
|----------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| <b>Selüloz</b>                   |                              |                                                                             |
| <b>Hemiselüloz</b>               |                              |                                                                             |
| <b>Nişasta</b>                   | - Arabinoksilan              | Tam tahılların kepek dokuları ve endospermi, sebze kabukları, yeşil fasulye |
| <b>Olmayan</b>                   | - Glukoarabinoksilan         |                                                                             |
| <b>Polisakkaritler</b>           | - Ksiloglukan                |                                                                             |
| <b>(MÜ <math>\geq</math> 10)</b> | - Kalloz                     |                                                                             |
|                                  | - B-glukan                   |                                                                             |
| <b>Pektin</b>                    |                              |                                                                             |
| Bağırsak florasında              | - Arabinan                   | Elma, narenciye, patates, şekerpancarı                                      |
| <b>Bifidobacterium</b>           | - Galaktan                   |                                                                             |
|                                  | - Arabinogalaktan            |                                                                             |
| <b>Polifruktoz/Fruktan</b>       |                              |                                                                             |
| <b>Faecalibacterium</b>          | - İnülin (2-60 MÜ)           | Hindiba, enginar, soğan, buğday                                             |
| <b>Hidrokolloidler</b>           |                              |                                                                             |
| <b>Ruminococcus</b>              | - Gam                        | Aloe vera, baklagiller, konjak, meyveler, sebzeler, sert kabuklu yemişler   |
| <b>Lactobacillus</b>             | - Musilaj                    |                                                                             |
|                                  | - Galaktan                   |                                                                             |
|                                  | - Mannan                     |                                                                             |
|                                  | - Psyllium                   |                                                                             |
| <b>Dirençli Nişasta 1:</b>       |                              | Öğütülmüş hububat ve tohumlar                                               |
| <b>Dirençli Nişasta</b>          | Fiziksel olarak ulaşılabilir |                                                                             |
| <b>(MÜ <math>\geq</math> 10)</b> | <b>Dirençli Nişasta 2:</b>   | Çiğ patates, mısır, olgunlaşmamış muz                                       |

|                                                          |                                                                                                      |                                                            |
|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Bağırsak florasında                                      | Doğal nişasta granülleri                                                                             |                                                            |
| <i>Bifidobacterium</i>                                   | <b>Dirençli Nişasta 3:</b> Jelatinize ve retrograde (fiziksel olarak modifiye)                       | Piştirilip dondurulmuş patates, kahvaltılık gevrekler      |
| <i>Ruminococcus</i>                                      | <b>Dirençli Nişasta 4:</b> Eterlenmiş, esterlenmiş ya da çapraz bağlanmış (kimyasal olarak modifiye) | Fırıncılık ürünleri                                        |
| <i>Roseburia Akkermania</i>                              | <b>Dirençli Nişasta 5:</b> Amiloz-lipid kompleksi                                                    | Kızarmış pirinç, kızarmış patates                          |
| <b>Dirençli/Sindirilemeyen Oligosakkaritler</b> (MÜ 3-9) | <b>Galakto-oligosakkarit</b>                                                                         | İnsan sütü, inek sütü                                      |
| Bağırsak florasında                                      | <b>Frukto-oligosakkarit</b>                                                                          | Kuşkonmaz, şekerpancarı, hindiba, soğan, sarımsak, domates |
| <i>Bifidobacterium</i>                                   | <b>Ksilo-oligosakkarit</b>                                                                           | Bambu filizi, meyveler, sebzeler, süt, bal                 |
| <i>Lactobacillus Akkermania</i>                          | <b>Dirençli maltodekstrin</b>                                                                        | Dirençli maltodekstrin                                     |
|                                                          | <b>Galaktosidaz</b>                                                                                  | Mercimek, fasulye, ebegümece, bezelye, baklagiller         |
|                                                          | - Rafinoz                                                                                            |                                                            |
|                                                          | - Laktosukroz                                                                                        |                                                            |

İnsan sindirim sistemi selülozu parçalayacak enzimlere sahip değildir ve en karmaşık olarak sindirebildiği karbonhidrat nişastadır. Diyet lifi, nişasta dışı polisakkaritleri (selüloz, hemiselüloz, pektin, gamlar,  $\beta$ -glukan, tahıl ve yulaf kepeği), alkolle çöktürme yöntemiyle elde edilen bitki karbonhidratlarını (inülin, oligosakkaritler ve fruktanlar), lignin ve türevlerini, bazı dirençli nişasta türlerini içermektedir (Şimşek ve Kılıç, 2012). Ayrıca, gum arabik ve guar gum gibi gam bileşikleri ile karragenan, agar ve aljinat gibi deniz yosunu polisakkaritleri de diyet lifi sınıfına dahildir (Çizelge 2).

**Çizelge 2.** Diyet lif çeşitleri ve kaynakları (Ou ve ark.,2001)

| Diyet Lif Çeşitleri |             |                                                                                                              |
|---------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                     | Özellikleri | Kaynakları                                                                                                   |
| Çözünür Lifler      | Pektin      | Galakturonik asit, ramnoz, arabinoz, galaktoz içeriği yüksek, orta lamede ve birincil duvarda bulunmaktadır. |
|                     | Gam         | Genelde heksoz monomerlerinden oluşmaktadır pentoz.                                                          |
|                     | Musilajlar  | Bitkilerde sentezlenen glikoprotein içerebilen bileşenlerdir.                                                |
| Çözünemez Lifler    | Selüloz     | Glikoz monomerlerinden oluşan, hücre duvarlarının ana bileşenidir.                                           |
|                     | Hemiselüloz | Birincil ve ikincil hücre duvarları                                                                          |
|                     | Lignin      | Aromatik alkoller ve diğer hücre duvarı bileşenlerinden oluşmaktadır                                         |



## **Diyet Lif Eldesi**

Meyve ve sebzelerden lif üretiminde genellikle ayıklama, yıkama, parçalama, kurutma ve öğütme işlemleri kullanılmaktadır (Göksu, 2019). Bunlara ek olarak düşük moleküler ağırlığa sahip bileşikler olan glikozitler, alkaloidler, şekerler, mineraller ve nişasta gibi bileşenlerin uzaklaştırılması amacıyla enzimler, bazlar, sülfürik asit tuzları, peroksitler veya mineral asitlerin seyreltilmiş çözeltileri ile işlem uygulanarak diyet lifi, bitkisel hücrelerden ayrıştırılmaktadır (Shelepina ve ark., 2014). Lee ve çalışma arkadaşları, bütün elma ve elma kabuğundan elde ettikleri tozları su içinde karıştırarak 121°C’de 15 dakika boyunca otoklavlamış, ardından santrifüj işlemi uygulamış ve geriye kalan kalıntıları dondurarak kurutmuştur. Elde edilen lifleri, buğday unu jel modeli kullanarak in vitro nişasta sindirilebilirliğini incelemek amacıyla değerlendirmiştir (Bae ve ark., 2016).

## **Diyet Lifinin İnsan Sağlığı Üzerine Etkisi**

Diyet lifi, vücutta sindirilemeyen, ancak sağlığınıza pek çok fayda sağlayan bir bileşendir. Diyet lifinin, obezite, kalp-damar hastalıkları, kolon kanseri ve diyabet gibi hastalıkların riskini azalttığı birçok çalışma ile kanıtlanmıştır (Borderias ve ark., 2005; Selani ve ark., 2016; Lin ve ark., 2019). Diyet lifinin en önemli özelliklerinden biri, suyu tutma ve dışkıyı yumuşatma yeteneğidir. Bu, dışkının hacmini artırarak bağırsak hareketlerini hızlandırır (Brownlee, 2011). Diyet lifleri bağırsak mikrobiyotası için besin kaynağı görevi görmektedir (Zang ve ark., 2023). Sindirim sisteminde tamamen sindirilmeden, bağırsakta bulunan yararlı bakteriler tarafından fermente edilerek sindirim sürecine katkıda bulunur. Bu fermente süreç, özellikle kolonda, sağlıklı bakteri florasının korunmasını sağlar ve zararlı bakterilerin çoğalmasını engeller (Kahlon ve ark., 2001). Ayrıca, diyetteki lif miktarının artması, fekal hacmin artmasına ve bağırsak geçiş süresinin hızlanmasına yardımcı olur (Saldamlı, 2007).

Diyet lifinin kanser üzerindeki etkileri de oldukça önemlidir, birçok kanser çeşidinin oluşmadan önlenmesini sağlayabilir. Diyet lifleri insan vücudunda dolaşımda olan hormonların konsantrasyonunu etkileyerek vücuttan uzaklaştırılmasına olanak sağlayabilir. Meyve ve sebzeler üzerinde yapılan araştırmalarda diyet lifinin östrojen enzimlerini engelleyerek östrojen salgısını azaltarak meme kanserini önlediği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, steroid hormonlarını azaltarak insülin benzeri büyüme faktörünün düzenlenmesine fayda sağlayarak yumurtalık kanseri riskini azaltabileceği bulunmuştur (He ve ark., 2022). Yapılan araştırmalar, lif açısından zengin diyetlerin kolon kanseri riskini azalttığını ortaya koymaktadır. Lif, sindirim sisteminde su çeker ve dışkıyı yumuşatarak bağırsak hareketlerinin hızlanmasını sağlar. Bununla birlikte, lifli gıdalar, bağırsakta fermente olarak kısa zincirli yağ asitlerinin üretimini artırır, bu da kanserojen maddelerin etkisini azaltır (Saldamlı, 2007). Ayrıca, lifli gıdalar, bağırsak florasında olumlu değişiklikler yaparak, kanser gelişiminde

etkili olabilecek zararlı mikroorganizmaların çoğalmasını engeller (Bingham ve ark., 1979).

Yüksek lif alımının, kolesterol seviyesinin düşmesini sağlayarak, kalp hastalıkları riskini azaltmaktadır. Diyet lifi, özellikle çözünür lifler, karaciğerdeki kolesterolü bağlayarak safra asitlerine dönüştürülmesini sağlar (Villanueva-Suarez ve ark., 2003). Bu da düşük yoğunluklu lipoprotein kolesterolünü düşürerek, kalp-damar hastalıkları riskini azaltmada önemli bir rol oynar (Kahlon ve ark., 2001).

Çözünebilen liflerin, diyabetin yönetimi ve obezite riskinin azaltılması konusunda önemli bir rol oynamaktadır (He ve ark., 2022). Glikozun kan dolaşımına geçişini yavaşlatarak kan şekerinin hızla yükselmesini engelleyerek, insülin seviyelerini dengelemeye yardımcı olabilir (Ou ve ark., 2001). Lif, mideyi uzun süre tok tutar ve bu da yemek yeme sıklığını ve miktarını azaltır. Bu mekanizma, aşırı yemek yeme riskini azaltarak obezitenin önlenmesine katkı sağlayabilir (Slavin, 2005). Ayrıca, lifli gıdaların, sindirim sistemini düzenleyerek vücutta yağ birikimini engellediği ve bu sayede kilo yönetimine yardımcı olabileceği öngörülmektedir (Slavin, 2005).

Lifli gıdalar, vücudun mineral ihtiyaçlarını karşılamak için gerekli olan biyoyararlanımı artırır (Zhang ve ark., 2005). Lif, özellikle kalsiyum, magnezyum ve demir gibi minerallerin emilimini iyileştirir (Dülger ve Şahan, 2011). Bununla birlikte, yüksek lifli diyetlerin, bağırsaklarda mineral emilimini artırarak kemik sağlığını iyileştirebileceği ve osteoporoz riskini azaltabileceği de öne sürülmektedir (Kurucu, 1987).

Dünya Sağlık Örgütü, Gıda ve Tarım Örgütü ve Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi yetişkinler için günlük alınması gereken lif miktarını 25 g olarak önermektedir (Mindrican ve ark., 2022). Bebekler için ise bu miktar 19 gram olarak önerilmektedir (Brooks ve ark., 2006).

### **Et Ürünlerinde Diyet Lifi Kullanımı**

İçerdiği biyolojik değeri yüksek protein, yağ asitleri, mineraller ve vitaminler sayesinde et beslenme bakımından birincil tüketim önceliğine sahip gıdalardandır (Atasoy ve ark., 2019). Bitkisel besinlerle kıyaslandığında A ve B12 vitaminleri, demir, selenyum ve folik asit gibi mikro besin öğeleri açısından oldukça zengindir. Bu nedenle dengeli bir diyetle kesinlikle bulundurulması gerekmektedir (Ekici ve Erçoşkun, 2007). Ancak yüksek oranda doymuş yağ 12 içeriği sebebiyle obezite, kanser ve kalp hastalıklarına yol açma riskini azaltmak için tüketiminin azaltılması yönünde tavsiyeler verilmektedir (Denktaş, 2017).

Bu nedenle, et endüstrisinde diyet liflerinin kullanımı hem sağlık açısından hem de ürünün tekstürel özelliklerini iyileştirme, pişirme kayıplarını azaltma ve maliyetleri düşürme gibi teknolojik faydalar açısından büyük bir öneme sahiptir (Yalınkılıç ve ark., 2012; Ergene ve Bingöl, 2019).

Et, içerdği yüksek kaliteli proteinler, temel yağ asitleri, çeşitli mineraller ve vitaminler sayesinde insan beslenmesinde vazgeçilmez bir gıda kaynağı olarak öne çıkmaktadır (Atasoy ve ark., 2019). Özellikle A ve B<sub>12</sub> vitaminleri ile demir, selenyum ve folik asit gibi mikro besin öğeleri bakımından bitkisel besin kaynaklarına kıyasla oldukça zengin olması, etin dengeli bir beslenme düzeninde mutlaka yer almasını gerekli kılmaktadır (Ekici & Erçoşkun, 2007). Ancak, et ürünlerinin yüksek düzeyde doymuş yağ içermesi; obezite, kardiyovasküler hastalıklar ve bazı kanser türleri gibi kronik hastalıklarla ilişkilendirildiğinden, bu olumsuz etkilerin azaltılmasına yönelik çeşitli stratejiler geliştirilmektedir (Denktaş, 2017). Bu bağlamda, et ve et ürünlerine diyet liflerinin ilavesi; hem sağlık açısından olumlu etkiler sağlamak hem de ürün kalitesini artırmak amacıyla önemli bir teknolojik yaklaşım olarak değerlendirilmektedir (Yalınkılıç ve ark., 2012; Ergene & Bingöl, 2019). Son dönemde et sanayisinde diyet liflerinin kullanımının artmasının temel nedenlerinden biri, emülsifiye et ürünlerinde yağ içeriğinin azaltılmasıyla birlikte, ürünlerin tat, aroma, renk ve su tutma kapasitesi gibi duyuşal ve fiziksel niteliklerinin korunmasının sağlanmasıdır (Henning ve ark., 2016). Bu hedef doğrultusunda, inülin, tahıl ve meyve kaynaklı lifler gibi çeşitli diyet lifleri; tek başına ya da diğer yardımcı bileşenlerle birlikte ürün formülasyonuna entegre edilmektedir. Söz konusu lif katkıları sayesinde, pişirme esnasındaki kayıpların önüne geçilmekte, ürünün yapısal özellikleri iyileştirilmekte ve üretim maliyetleri azaltılarak, orijinal ürünlerle rekabet edebilecek düzeyde kalite elde edilmesi mümkün olmaktadır (Henning ve ark., 2016; Yalınkılıç ve ark., 2012). Et ürünlerine diyet lifi ilavesi, insan sağlığına olan olumlu katkılarının yanı sıra; su tutma kapasitesini artırma, yağ bağlama yeteneği, donma ve çözünme sürecindeki stabilitenin korunması, jel yapısı oluşturabilme, doku üzerinde düzenleyici etkiler sağlama, nötr tat profili sunma ve pişirme sırasında meydana gelen kayıpları azaltma gibi çeşitli teknolojik avantajları nedeniyle de tercih edilmektedir (Mishra ve ark., 2023).

## SONUÇ

Et teknolojisinde diyet lifi kullanımı, hem beslenme hem de gıda teknolojisi açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Diyet liflerinin et ürünlerine ilavesi, ürünlerin besin değerini artırırken aynı zamanda yağ oranını düşürmekte ve daha sağlıklı alternatifler sunulmasına olanak sağlamaktadır. Bunun yanı sıra su tutma kapasitesini artırması, tekstürel özellikleri iyileştirmesi ve raf ömrünü uzatması gibi teknolojik faydalar sağlamaktadır.

Gelecekte yapılacak çalışmaların, farklı lif kaynaklarının kombinasyonlarının optimize edilmesi, duyuşal kalite üzerindeki etkilerinin detaylandırılması ve endüstriyel ölçekte uygulanabilirliğin artırılması üzerine yoğunlaşması beklenmektedir. Bu bağlamda diyet lifi, sürdürülebilir ve fonksiyonel et ürünleri geliştirilmesinde önemli bir bileşen olarak değerlendirilmektedir.

## KAYNAKÇA

- Abdel-Naeem, H. H. S., Elshebrawy, H. A., Imre, K., Morar, A., Herman, V., Paşcalău, R., & Sallam, K. I. (2022). Antioxidant and Antibacterial Effect of Fruit Peel Powders in Chicken Patties. *Foods*, 11(3), 301. <https://doi.org/10.3390/foods11030301>
- Araç, D. (2023). *Yulağ unuyla yapılan köftelerde fizikokimyasal özelliklerin belirlenmesi ve akrilamid oluşumuna etkilerinin araştırılması* (Yüksek lisans tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü). Afyonkarahisar.
- Atasoy, H., Özkan, K., Karadağ, A., & Sağdıç, O. (2019). Farklı partikül boyutlarındaki enginar lifi ilavesinin köfte kalitesi üzerine etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 16, 275–282.
- Bae, I. Y., Jun, Y., Lee, S., & Lee, H. G. (2016). Characterization of apple dietary fibers influencing the in vitro starch digestibility of wheat flour gel. *LWT Food Science and Technology*, 65, 158-163.
- Bilek, S., Melikoğlu, A. Y., & Cesur, S. (2019). Tarımsal atıklardan selüloz nanokristallerinin eldesi, karakteristik özellikleri ve uygulama alanları. *Akademik Gıda*, 17(1), 140-148.
- Bingham, S. A., Williams, D. D. R., Cole, T. J., & James, W. P. T. (1979). Dietary fibre consumption and regional large bowel cancer mortality in Britain. *British Journal of Cancer*, 40(3), 456-463.
- Bingöl, M. (2022). *Köfte üretiminde astaksantin kullanımının çeşitli kalite kriterleri ve heterosiklik aromatik amin oluşumuna etkisi* (Yüksek lisans tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü). Erzurum.
- Biswas, O., Kandasamy, P., & Kumar Das, S. (2022). Effect of dragon fruit peel powder on quality and acceptability of fish nuggets stored in a solar cooler (5±1°C). *Journal of Food Science and Technology*, 59(9), 3647–3658.
- Borderías, A. J., Sánchez-Alonso, I., & Pérez-Mateos, M. (2005). New applications of fibres in foods: Addition to fishery products. *Trends in Food Science & Technology*, 16(10), 458-465.
- Brooks, S. P. J., Mongeau, R., Deeks, R., Lampi, B. J., & Brassard, R. (2006). Dietary fibre in baby foods of major brands sold in Canada. *Journal of Food Composition and Analysis*, 19(1), 59-66.
- Brownlee, I. A. (2011). The physiological roles of dietary fibre. *Food Hydrocolloids*, 25, 238-250.
- Burdurlu, H. S., & Karadeniz, F. (2003). Gıdalarda diyet lifinin önemi. *Gıda Mühendisliği Dergisi*, 7(15), 18-25.
- Burkitt, D. P. (1971). Epidemiology of cancer of the colon and rectum. *Cancer*, 28(1), 3-13.

- Cegiełka, A., Perchuć, J., Pietrzak, D., Chmiel, M. (2024). Hamburger Üretiminde Siyah Aronya Posası Kullanma Girişimi. *Gıda Biyoteknolojisi ve Tarım Bilimi*, 78, 68-73. <https://doi.org/10.70734/fbas/195628>
- Codex Alimentarius International Food Standard. (2021). Guidelines on nutrition labelling.
- Coşar, N. (2023). *Yaygın karabuğday (Fagopyrum esculentum Moench) kepeği ilave edilerek üretilen köftelerin kalite özelliklerinin belirlenmesi* (Yüksek lisans tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü). Tekirdağ.
- Çelik, P. (2012). Kanatlı eti (hindi eti ve tavuk eti) ve kırmızı et karışımı ile elde edilen köftelerin kalite özelliklerinin belirlenmesi (Yüksek lisans tezi). Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, 134s.
- Çevik Özkır, A. (2021). Doğal bir antimikrobiyel ve antioksidan olan propolisin köfte üretiminde kullanımı (Yüksek lisans tezi). Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, 81s.
- Dai, F. J., & Chau, C. F. (2017). Classification and regulatory perspectives of dietary fiber. *Journal of Food and Drug Analysis*, 25(1), 37-42. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2016.09.006>
- de Menezes, E. W., Giuntini, E. B., Dan, M. C. T., Sardá, F. A. H., & Lajolo, F. M. (2013). Codex dietary fibre definition—Justification for including carbohydrates with 3 to 9 degrees of polymerization. *Food Chemistry*, 140(3), 581-585. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.02.075>
- Decker, E. A., Xiong, Y. L., Calvert, J. T., Crum, A. D., & Blanchard, S. P. (1993). Chemical, physical and functional properties of oxidized turkey white muscle myofibrillar proteins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 41, 186-189.
- Denktaş, S. (2017). Et ve et ürünlerinin fonksiyonelliğinin artırılması. *Kocatepe Veterinary Journal*, 10(2), 106-117.
- Dülger, D., & Şahan, Y. (2011). Diyet lifinin özellikleri ve sağlık üzerindeki etkileri. *U. Ü. Ziraat Fakültesi Dergisi*, 25(2), 147-157.
- Ekici, L., & Erçoşkun, H. (2007). Et ürünlerinde diyet lif kullanımı. *Gıda Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 1, 83-90.
- Erdoğan, M. (2019). *Chia (Salvia hispanica L.) tohumu ilave edilmiş köftelerin fizikokimyasal özelliklerinin belirlenmesi* (Yüksek lisans tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü). Tekirdağ.
- Ergene, E., & Bingöl, B. (2019). Diyet lifi içeriği yüksek bazı gıdalar ve beslenme üzerindeki etkileri. *Adnan Menderes Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi Dergisi*, 3(1), 70-78.

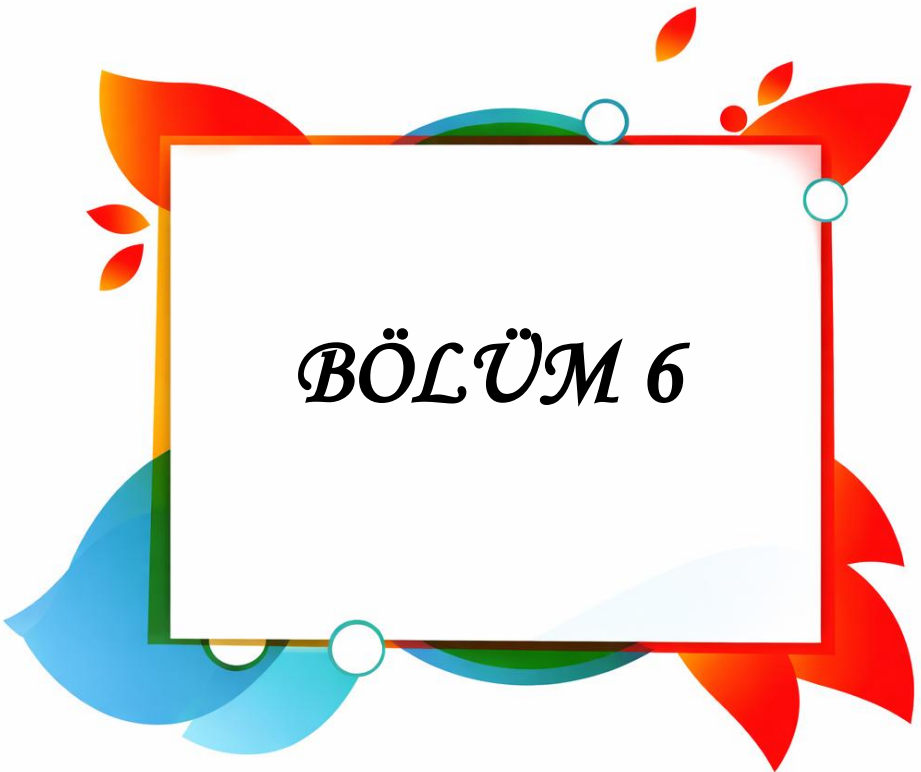
- FAO/WHO Codex Alimentarius Commission. (2010). *Codex Alimentarius (CODEX) nutrition labelling guidelines* CAC/GL 2-1985 (latest amendment 2010). FAO.
- Fernández, J., Pérez-Alvarez, J. A., & Fernández-López, J. A. (1997). Thiobarbituric acid test for monitoring lipid oxidation in meat. *Food Chemistry*, 59, 345-353.
- Fernández-López, J., Viuda-Martos, M., & Pérez-Alvarez, J. A. (2021). Quinoa and chia products as ingredients for healthier processed meat products: Technological strategies for their application and effects on the final product. *Current Opinion in Food Science*, 40, 26-32.
- Fu, J., Zheng, Y., Gao, Y., & Xu, W. (2022). Dietary fiber intake and gut microbiota in human health. *Microorganisms*, 10, 1-18.
- Gonçalves, L. A., Lorenzo, J. M., Bermúdez, R., Pateiro, M., & Trindade, M. A. (2024). Effect of *Opuntia ficus-indica* extract in pro-healthy chicken patties: Physicochemical properties and oxidative stability. *Foods*, 13(23), 3970. <https://doi.org/10.3390/foods13233970>
- Göksu, A. Ö. (2019). Ultrason ön uygulamalı ve mikrodalga kurutma yöntemi ile şeker pancarı posasından diyet gıda lifi eldesi (Yüksek lisans tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Guliyeva, F. (2020). *Yarpuz (Mentha pulegium L.) kullanılarak üretilen köftelerin soğukta muhafaza süresince lipit oksidasyonu ve renk kararlılığının değerlendirilmesi* (Yüksek lisans tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Gıda Mühendisliği ABD). Samsun.
- He, Y., Wang, B., Wen, L., Wang, F., Yu, H., Chen, D., Su, X., & Zhang, C. (2022). Effects of dietary fiber on human health. *Food Science and Human Wellness*, 11, 1-10.
- Henning, S. S. C., Tshalibe, P., & Hoffman, L. C. (2016). Physico-chemical properties of reduced-fat beef species sausage with pork back fat replaced by pineapple dietary fibres and water. *LWT- Food Science and Technology*, 74, 92-98. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.07.007>
- Jones, J. M. (2014). Codex-aligned dietary fiber definitions help to bridge the ‘fiber gap’. *Nutrition Journal*, 13, 34. <https://doi.org/10.1186/1475-2891-13-34>
- Kahlon, T. S., Chow, F. I., Hoefer, J. L., & Betschart, A. A. (2001). Effect of wheat bran fiber and bran particle size on fat and fiber digestibility and gastrointestinal tract measurements in the rat. *Cereal Chemistry*, 78(4), 481-484.
- Koishybayeva, A. & Korzeniowska, M. (2024). Elma Posası Tozunun Hindi Sosislerinin Kalite Özellikleri Üzerindeki Kullanımı ve Etkisi. *Gıdalar* , 13 (17), 2807. <https://doi.org/10.3390/foods13172807>

- Köker, Ö. (2020). *Farklı çemen formülasyonları ile üretilen hamburger köftelerin fizikokimyasal ve mikrobiyolojik kalitelerinin belirlenmesi* (Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü). Isparta.
- Köksel, H., & Özboy, O. (1993). Besinsel liflerin insan sağlığındaki rolü. *Gıda*, 18(5), 309-314.
- Kumar, V., Sinha, A. K., Makkar, H. P., de Boeck, G., & Becker, K. (2012). Dietary roles of non-starch polysaccharides in human nutrition: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 52(10), 899-935. <https://doi.org/10.1080/10408398.2010.512671>
- Kurucu. (1987). *Beslenme*. Milli Eğitim Basımevi.
- Lin, Y., Chen, K., DanTu, D., Yu, X., Dai, Z., & Shen, Q. (2019). Characterization of dietary fiber from wheat bran (*Triticum aestivum* L.) and its effect on the digestion of surimi protein. *LWT*, 102, 106-112.
- Miller, K. B. (2020). Whole grain and dietary fiber recommendations and intake levels in different countries: A review. *Nutrition Reviews*, 78(Suppl. 1), 29-36. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuz052>
- Mindrican, C. B. I., Ziani, K., Mititelu, O., Oprea, E., Neacsu, S. M., Morosan, E., Dumitrescu, D. E., Rosca, A. C., Draganescu, D., Negrei, C. (2022). Therapeutic benefits and dietary restriction of fiber intake: A state of the art review. *Nutrients*, 14, 1-29.
- Mishra, B. P., Mishra, J., Paital, B., Rath, P. K., Jena, M. K., Reddy, B. V. V., Pati, P. K., Panda, S. K., Sahoo, D. K. (2023). Properties and physiological effects of dietary fiber-enriched meat products: A review. *Frontiers in Nutrition*, 10, 1-17.
- Ou, S., Kwok, K., Li, Y., & Fu, L. (2001). In vitro study of possible role of dietary fiber in lowering postprandial serum glucose. *Food Chemistry*, 49(4), 1026-1029.
- Paula, M. M. O., Silva, J. R. G., Oliveira, K. L., Massingue, A. A., Ramos, E. M., Junior, A. A. B., Silva, M. H. L., & Silva, V. R. O. (2019). Technological and sensory characteristics of hamburgers added with chia seed as fat replacer. *Food Technology*, 49(08), 1-10.
- Raigond, P., Ezekiel, R., & Raigond, B. (2015). Resistant starch in foods: A review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(10), 1968-1978. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6966>
- Rezende, E. S. V., Lima, G. C., & Naves, M. M. V. (2021). Dietary fibers as beneficial microbiota modulators: A proposed classification according to prebiotic categories. *Nutrition*, 89, 111217. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2021.111217>
- Ribeiro, W. O., Ozaki, M. M., Santos, M., Rodriguez, A. P., Castro, R. J. S., Sato, H. H., Campagnol, P. C. B., & Pollonio, M. A. R. (2023). Improving the textural

- and nutritional properties in restructured meat loaf by adding fibers and papain designed for elderly. *Food Research International*, 165, 2–12.
- Roberfroid, M. B. (2007). Inulin-type fructans: Functional food ingredients. *Journal of Nutrition*, 137(11 Suppl.), 2493S–2502S. <https://doi.org/10.1093/jn/137.11.2493S>
- Salçın, N., & Erçoşkun, H. (2021). Diyet lifi ve sağlık açısından önemi. *Akademik Gıda*, 19(2), 234-243.
- Saldamlı, İ. (2007). *Gıda Kimyası*. Hacettepe Üniversitesi Yayınları, Ankara.
- Sarv, V., Kerner, K., Rimantas Venskutonis, P., Rocchetti, G., Paolo Becchi, P., Lucini, L., Tänavots, A., & Bhat, R. (2023). Untargeted metabolomics and conventional quality characterization of rowanberry pomace ingredients in meatballs. *Food chemistry: X*, 19, 100761. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100761>
- Selani, M. M., Shirado, G. A. N., Margiotta, G. B., Erick Saldaña, E., Spada, F. P., Piedade, S. M. S., Contreras-Castillo, C. J., Canniatti-Brazaca, S. G. (2016). Effects of pineapple byproduct and canola oil as fat replacers on physicochemical and sensory qualities of low-fat beef burger. *Meat Science*, 112, 69-76.
- Serdaroglu, M., & İpek, G. (2019). Fermente sosis formülasyonlarında uygulanan yenilikçi yaklaşımlar. *Akademik Gıda*, 17, 281-290. <https://doi.org/10.24323/akademik-gida.613642>
- Shelepina, N. V., Polynkova, N. E., & Klimova, D. O. (2014). Prospects of pea grain coats use for obtaining dietary fibers. *Life Science Journal*, 11(12), 802-805.
- Slavin, J. L. (2005). Dietary fiber and body weight. *Nutrition*, 21(3), 411-418.
- Stephen, A. M., Champ, M. M., Cloran, S. J., Fleith, M., van Lieshout, L., Mejbörn, H., & Burley, V. J. (2017). Dietary fibre in Europe: Current state of knowledge on definitions, sources, recommendations, intakes, and relationships to health. *Nutrition Research Reviews*, 30(2), 149-190. <https://doi.org/10.1017/S095442241700004X>
- Şimşek, A. B., & Kılıç, B. (2012). Et ve et ürünlerinde antioksidan kullanımındaki güncel gelişmeler. *Akademik Gıda*, 10(2), 75-83.
- Thompson, J., & Manore, M. (2005). Fiber, nutrition: An applied approach. Publishing at Benjamin Cummings, 1302 Sansome St., San Francisco, p. 123-139.
- Tiske İnan, S. S. (2014). Farklı oranlarda lupin, ruşeym ve tofu ilavesinin tavuk sosislerinin depolama süresinde bazı fizikokimyasal, duyuusal ve tekstürel özelliklerinin belirlenmesi (Doktora tezi). Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.



- Tungland, B. C., & Meyer, D. (2002). Nondigestible oligo- and polysaccharides (dietary fiber): Their physiology and role in human health and food. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 1(3), 90-109. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2002.tb00009.x>
- Villanueva-Suarez, M. J., Redondo-Cuenca, A., Rodríguez-Sevilla, M. D., De Las Waldron, K. W., Parker, M. L., & Smith, A. C. (2003). Plant cell walls and food quality. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2(4), 128-146.
- Villanueva-Suarez, M. J., Redondo-Cuenca, A., Rodríguez-Sevilla, M. D., De Las Waldron, K. W., Parker, M. L., & Smith, A. C. (2003). Plant cell walls and food quality. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2(4), 128-146.
- Yağlı, S. (2013). Diyet lif tüketim sıklığı ile kolon kanseri arasındaki ilişki (Yüksek lisans tezi). Sağlık Bilimleri Enstitüsü.
- Yalınkılıç, B., Kaban, G., & Kaya, M. (2012). The effects of different levels of orange fiber and fat on microbiological, physical, chemical and sensorial properties of sucuk. *Food Microbiology*, 29, 255-259.
- Zhang, J., Li, Y., & Torres, M. E. (2005). How does a suicide attempter eat differently from others? Comparison of macronutrient intakes. *Nutrition*, 21, 711-277.
- Zhang, X., Feng, T., & Tuncil, Y. E. (2023). Editorial: Gut microbiota modulation by dietary fiber on human health: Processes and mechanisms. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1-3.
- Zhao, D., Guo, C., Liu, X. et al. Effects of insoluble dietary fiber from kiwi fruit pomace on the physicochemical properties and sensory characteristics of low-fat pork meatballs. *J Food Sci Technol* 58, 1524–1537 (2021). <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04665-2>



## *BÖLÜM 6*

# Isıl Sistemlerde Enerji Verimliliği: Temel İlkelerden Yenilenebilir Entegrasyona, Teknoloji, Strateji ve Politika Boyutlarıyla Kapsamlı Bir Değerlendirme

---

*Hakan Tutumlu<sup>1</sup>*

## 1. GİRİŞ: KÜRESEL ENERJİ BAĞLAMI VE ISIL SİSTEMLERİN ÖNEMİ

Yirmi birinci yüzyılın ilk çeyreğinde insanlık, birbiriyle derin biçimde bağlantılı üç büyük enerji sorunuyla karşı karşıya gelmiştir. Bunlar sırasıyla;

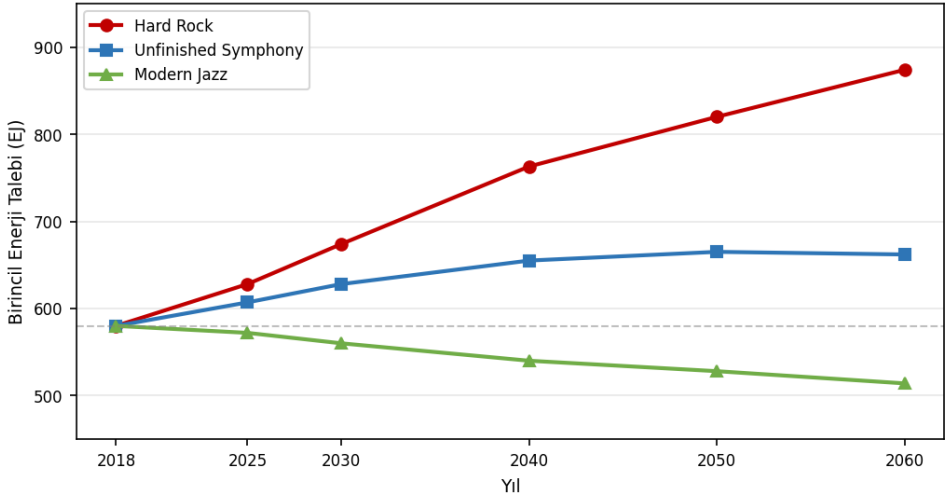
- Sürekli artan birincil enerji talebi,
- Fosil yakıt rezervlerinin sınırlılığı ve
- Fosil yakıtların yakılmasından kaynaklanan iklim krizi gibi sorunlar oluşmaktadır.

Kober vd. (2020), Dünya Enerji Konseyi'nin 2019 senaryolarını inceleyen çalışmalarında, küresel birincil enerji talebinin 2018 yılı itibarıyla yaklaşık 580 EJ (exajoule) düzeyinde olduğunu ifade etmektedir. Ayrıca bu değerin 2060 yılına kadar izlenecek senaryoya bağlı olarak 514 EJ'den (etkin politika ve teknoloji dönüşümü kurgusu olan **Modern Jazz** senaryosu) 874 EJ'ye (yüksek büyüme ve fosil yakıt hâkimiyetini öngören **Hard Rock** senaryosu) kadar değişen bir aralığa ulaşabileceğini ortaya koymuştur.

Söz konusu senaryoların temel ayırım noktasını, enerji verimliliği politikalarının etkinliği ile yenilenebilir enerji teknolojilerinin piyasaya nüfuz hızı oluşturmaktadır. Şekil 1'de görüldüğü üzere, iklim hedefleriyle uyumlu yollarda birincil enerji talebi düşme eğilimi gösterirken fosil yakıt odaklı senaryolarda talep giderek tırmanmaya devam etmektedir.

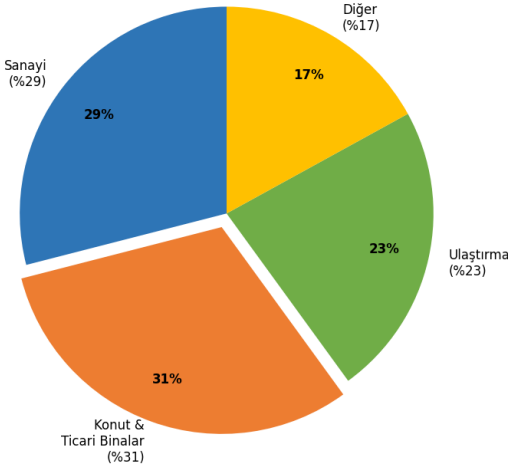
---

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Gaziantep Üniversitesi, ORCID: 0000-0003-3884-7015



**Şekil 1.** Küresel Birincil Enerji Talebi: WEC 2019 Senaryoları (2018-2060) (Kober vd. (2020))

Küresel enerji tüketiminin sektörel dağılımı incelendiğinde, bina ve endüstri sektörlerinin birlikte toplam enerji tüketiminin yaklaşık yüzde altmış oranına karşılık geldiği görülmektedir. Şekil 2’den izlenebileceği üzere, konut ve ticari binalar tek başına küresel enerji tüketiminin yaklaşık yüzde otuz birini oluşturmaktadır (Kober vd., 2020). Bu oran, bina sektörünü enerji tasarrufu potansiyeli en yüksek alan olarak konumlandırmaktadır.



**Şekil 2.** Küresel Enerji Tüketiminde Sektörel Dağılım (2019)( Kober vd. (2020))

Bina sektörünün enerji tüketiminde ısı sistemleri, diğer bir deyişle ısıtma, soğutma ve sıcak su hazırlama süreçleri baskın bir yer tutmaktadır. Cheekatamarla (2020), bina enerji tüketiminin yaklaşık yüzde yetmişinin ısı alışverişine dayalı süreçlerden kaynaklandığını vurgulamaktadır. Benzer biçimde

Eze vd. (2024), ısı sistemlerinin enerji dönüşümü içindeki kritik rolüne dikkat çekerek mevcut teknolojilerin verimlilik artışına ilişkin önemli bir potansiyel barındırdığını ifade etmektedir.

Enerji verimliliğinin önemine dair farkındalık, toplumun farklı kesimlerinde henüz yeterli düzeye ulaşamamıştır. Zografakis vd. (2008), enerji verimliliğine yönelik etkin bir eğitim politikasının davranışsal dönüşümün zorunlu ön koşulunu oluşturduğunu ve teknik müdahalelerin tek başına yetersiz kaldığını öne sürmektedir. Bu perspektiften hareketle işbu bölüm, mühendislik boyutu kadar politika, ekonomi ve sosyal boyutları da birleşik bir perspektifle ele almaktadır.

Bu çalışma kapsamında;

- Enerji verimliliğinin temel termodinamik ilkeleri ve ölçüm yöntemleri,
- HVAC sistemleri, ısı enerji depolama ve bina yalıtımına yönelik teknolojik çözümler,
- Yenilenebilir enerji entegrasyonu ile akıllı bina uygulamaları ve
- Enerji verimliliği önündeki engeller, politika araçları ve stratejik yaklaşımlarına odaklanarak incelenmiştir.

## **2. ISIL SİSTEMLERDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ: TEMEL İLKELER, KAVRAMLAR VE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ**

### **2.1. Enerji Verimliliğinin Termodinamik Temelleri**

Enerji verimliliği kavramı, teknik açıdan belirli bir faydalı çıktının elde edilmesi için tüketilen birincil enerji miktarının minimize edilmesi ilkesine dayanmaktadır. Kanoğlu vd. (2012), enerji sistemlerinin verimlilik değerlendirmesinde termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarının birlikte kullanılmasının zorunlu olduğunu vurgulamaktadır. Birinci yasa verimliliği, kullanılabilir enerji çıktısının girdi enerjisine oranı olarak tanımlanırken ikinci yasa (ekserji) verimliliği, sistemin termodinamik mükemmellik sınırına ne ölçüde yaklaştığını göstermektedir.

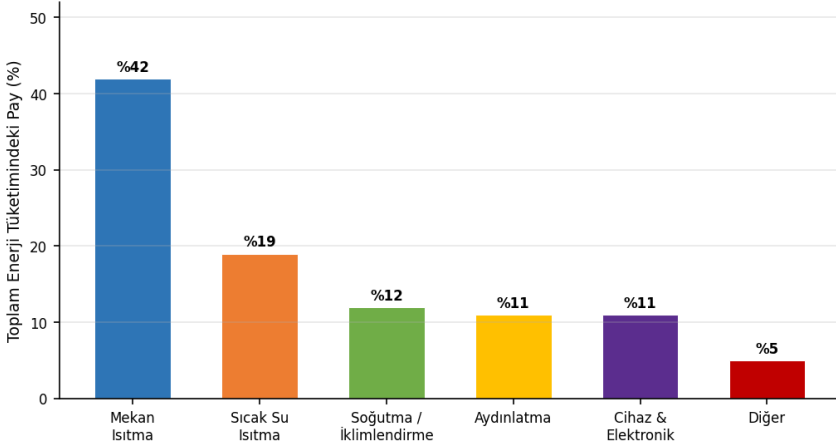
Isı sistemler bağlamında bu ayrım son derece kritiktir. Örneğin, düşük sıcaklık düzeyleri gerektiren bir ısıtma uygulamasında yüksek sıcaklık kaynaklarının kullanılması, birinci yasa açısından kabul edilebilir görünse de ekserji açısından ciddi bir israf anlamına gelmektedir. Varone ve Aebischer (2001), verimlilik değerlendirmelerindeki metodolojik tercihlerin politika tasarımı üzerinde doğrudan etkiler yarattığını göstermektedir.

## 2.2. Performans Katsayısı ve Temel Verimlilik Metrikleri

Isıl sistemlerin verimlilik karşılaştırmasında en yaygın kullanılan gösterge Performans Katsayısı (COP-Coefficient of Performance)'dır. COP, belirli bir mekânsal koşulda ısı pompası ya da soğutma sisteminin ürettiği ısı enerji miktarının tükettiği elektrik enerjisine oranı olarak ifade edilmektedir. Soğutma sistemleri için ise Enerji Verimliliği Oranı (EER-Energy Efficiency Ratio) yaygın biçimde kullanılmaktadır.

Alves vd. (2016), HVAC sistemlerinde enerji verimliliği metriklerinin ölçülmesi ve sınıflandırılması üzerine gerçekleştirdikleri kapsamlı çalışmada, veri merkezlerinden ticari binalara uzanan geniş bir uygulama yelpazesinde COP değerlerindeki belirgin farklılıkları ortaya koymuştur. Patterson (2012) ise özellikle büyük ölçekli ısı yönetim uygulamalarında verimlilik metriklerinin standart bir çerçeveye kavuşturulmasının tasarım ve işletim kararları açısından belirleyici bir işlev üstlendiğini ileri sürmektedir.

Şekil 3, konut binalarında son kullanım enerji dağılımını özetlemektedir. Bu dağılım, termal süreçlerin (ısıtma, soğutma, sıcak su) toplam tüketimdeki ağırlığını açıkça ortaya koymakta ve ısı sistemlere odaklanmanın neden öncelikli bir strateji olduğunu somutlaştırmaktadır.



Şekil 3. Konut Binalarında Son Kullanım Enerji Dağılımı (ASHRAE (2021))

## 2.3. Enerji Verimliliğinin Çoklu Faydaları ve Gösterge Çerçevesi

Enerji verimliliğinin getirilerini yalnızca enerji tasarrufu ve maliyet azaltımı olarak tanımlamak yetersiz kalmaktadır. Reuter vd. (2020), enerji verimliliğinin çoklu faydalarını kapsamlı bir gösterge seti çerçevesinde değerlendiren çalışmalarında beş ana fayda kategorisi tanımlamaktadır. Bunlar sırasıyla; enerji sistemi faydaları, ekonomik faydalar, çevresel faydalar, sosyal faydalar ve sağlık faydaları olarak ifade edilmiştir. Söz konusu çalışma, bu kategoriler genelinde

toplam 62 gösterge tespit etmiş ve bunların 43'ünün nicel olarak ölçülebilir nitelik taşıdığını belirlemiştir.

Bu bulgular, enerji verimliliği politikalarının yalnızca karbon hedefleri perspektifinden değil bütünselik bir sürdürülebilirlik çerçevesinden ele alınması gerektiğine işaret etmektedir. Reuter vd. (2020) tarafından geliştirilen bu çok boyutlu yaklaşım, yatırım kararlarında 'görünmez faydaların' göz ardı edilmesinden kaynaklanan sistematik değerlendirme hatalarını gidermek açısından da önemli bir işlev üstlenmektedir. Bölüm 5'te bu boyutlar politika tasarımı perspektifinden daha ayrıntılı ele alınmaktadır.

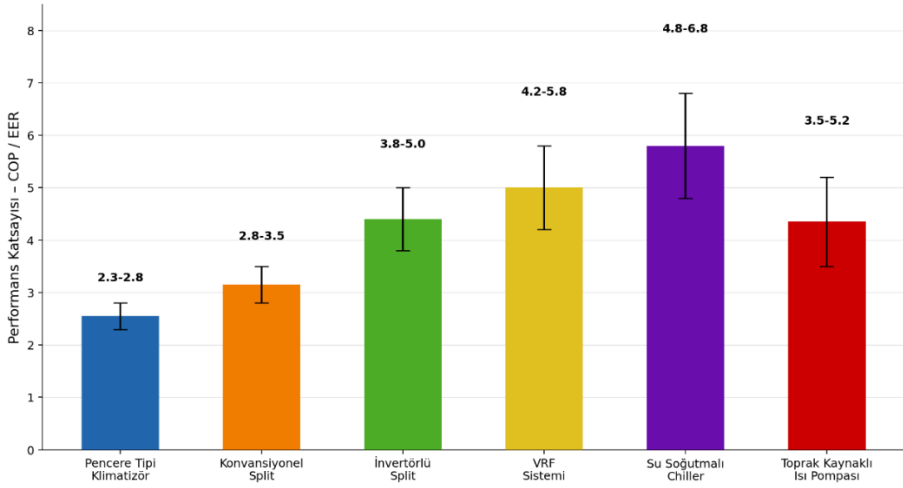
Agrawal vd. (2023) ise Avrupa'nın yedi farklı ülkesinden enerji verimliliği projelerini kapsayan karşılaştırmalı analizlerinde, verimlilik potansiyelinin büyük ölçüde gerçekleştirilememesinin ardında yatan sistemsel nedenleri irdelemektedir. Yazarlar, finans, bilgi ve davranış boyutlarındaki engellerle mücadelede bütünselik bir sistem yaklaşımının zorunluluğunu vurgulamaktadır.

### **3. TEKNOLOJİK ÇÖZÜMLER: HVAC SİSTEMLERİ, ISIL DEPOLAMA VE BİNA UYGULAMALARI**

#### **3.1. HVAC Sistemlerinde Teknolojik Gelişmeler ve Verimlilik Sınırları**

Bina enerji tüketiminin en büyük payına sahip alt sistem olan HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) teknolojileri, son iki on yılda köklü bir dönüşüm geçirmiştir. Olatunde vd. (2024), enerji açısından verimli HVAC teknolojilerine yönelik kapsamlı incelemelerinde şu değişiklikler yapılmalıdır. Bunlar, sabit hızlı motorlardan inverter sürücülü sistemlere, standart soğutuculardan değişken debi soğutkanı (VRF-Variable Refrigerant Flow) sistemlerine ve geleneksel termostatlardan derin pekiştirmeli öğrenme algoritmalarına dayalı kontrol sistemlerine uzanan çok katmanlı bir teknoloji tablosunu sistematik biçimde ortaya konularak HVAC sistemlerinde enerji verimliliği açısından ciddi oranda kazanç sağlayacağı gösterilmektedir.

Bu gelişim çizgisinin en çarpıcı göstergesi, COP değerlerindeki kayda değer artıştır. Şekil 4, farklı HVAC teknolojilerinin tipik COP aralıklarını karşılaştırmalı biçimde sunmaktadır. Pencere tipi klimalar 2,3-2,8 aralığında kalan COP değerleriyle en düşük verimliliği sunarken su soğutmalı chiller sistemleri 4,8-6,8; toprak kaynaklı ısı pompaları ise 3,5-5,2 COP aralığında çalışmaktadır.



**Şekil 4.** HVAC Sistem Türlerine Göre Enerji Verimliliği Karşılaştırması (COP/EER)(*Alves vd. (2016)*)

HVAC sistemlerinin yönetimi bağlamında yapay zekâ destekli kontrol yaklaşımları giderek önem kazanmaktadır. Nguyen vd. (2023), derin pekiştirmeli öğrenme (DRL-Deep Reinforcement Learning) yöntemini HVAC kontrol stratejilerine uygulayan ve model tabanlı simülasyonlar aracılığıyla bina iklimlendirme sistemlerini optimize etmeyi hedefleyen çalışmalarında, geleneksel kural tabanlı kontrole kıyasla %15 ile %25 arasında değişen enerji tasarrufu potansiyeli ortaya koymuştur. DRL yaklaşımı ile talep esnekliği, gerçek zamanlı tarife sinyalleri ve kullanıcı konfor kısıtları gibi çok boyutlu kısıtları aynı anda optimize edebilme kapasitesiyle geleneksel yöntemlere belirgin bir üstünlük sağlamaktadır.

### 3.2. Isıl Enerji Depolama: Teknolojiler ve Uygulama Çerçevesi

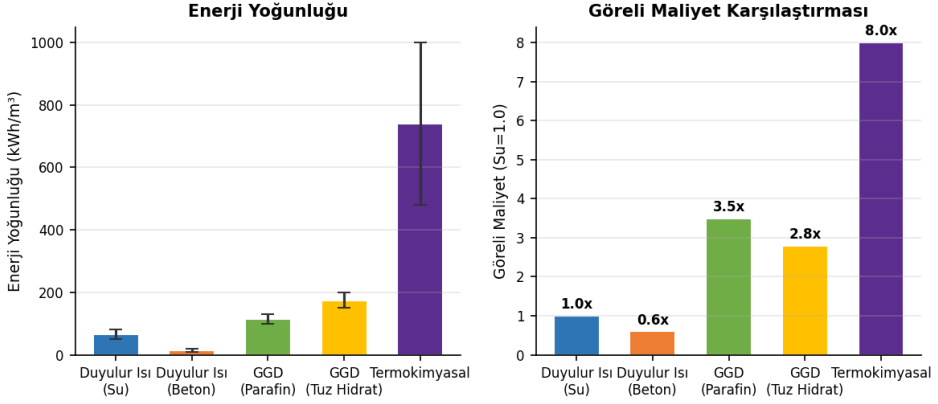
Isıl enerji depolama (IED/TED-Thermal Energy Storage) teknolojileri, ısıtma ve soğutma sistemlerindeki anlık talep dalgalanmalarını düzeltme, pik yük azaltma ve yenilenebilir enerji kaynaklarının süreksizliğini giderme işlevleriyle sürdürülebilir enerji sistemlerinin vazgeçilmez bileşenlerinden biri haline gelmiştir. Eze (2025), ısııl enerji sistemlerindeki yenilikleri kapsamlı biçimde ele alarak geleneksel ile ortaya çıkan teknolojiler arasındaki köprüyü analiz etmektedir. Eze vd. (2024) ise ısııl sistemler için enerji verimliliği teknolojilerindeki ilerlemeleri sistematik bir değerlendirme çerçevesinde sunmaktadır.

Temel IED teknolojileri üç ana kategoride ele alınmaktadır:

- **Duyulur ısı depolama:** En yaygın ve ekonomik çözüm olan su tankı sistemleri  $50-80 \text{ kWh m}^{-3}$  enerji yoğunluğu sunarken beton/kaya gibi katı ortamlar  $10-20 \text{ kWh m}^{-3}$  düzeyinde kalmaktadır.



- **Gizli ısı depolama (GGD/PCM):** Faz değıştiren malzemeler (parafin, tuz hidratlar) 100-200 kWh m<sup>-3</sup> enerji yoğunluğuna ulaşabilmekte ve böylece duyulur ısı sistemlerine kıyasla çok daha kompakt çözümler sunmaktadır.
- **Termokimyasal depolama:** Kimyasal reaksiyonlara dayanan bu ileri teknoloji 480-1000 kWhm<sup>-3</sup> gibi son derece yüksek enerji yoğunluğu sağlamakla birlikte maliyet ve dayanıklılık sorunları nedeniyle ticarileşme aşamasındadır.



**Şekil 5.** Isıl Enerji Depolama Teknolojilerinin Enerji Yoğunluğu ve Görelî Maliyet Karşılaştırması (Eze vd. (2024); Eze (2025))

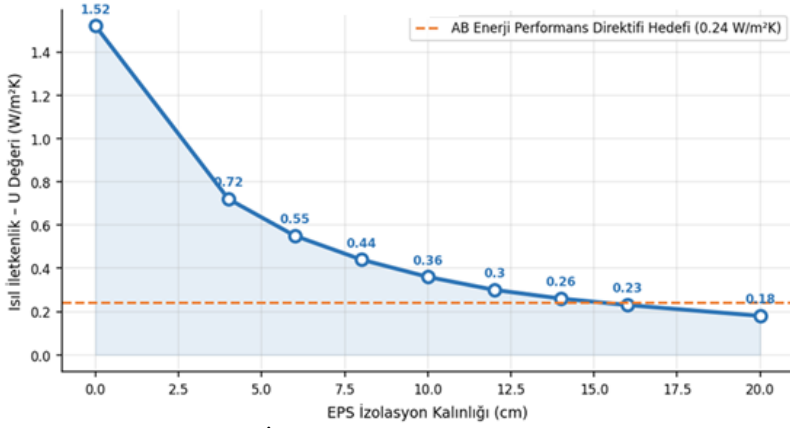
Qin vd. (2021), yeni nesil ısıl yönetim malzemelerini sürdürülebilir bina uygulamaları perspektifinden ele aldıkları çalışmalarında, faz değıştiren malzemelerin, aerojellerin ve nano-kapsüllü PCM çözümlerinin bina kabuğu ile HVAC sistemleriyle entegrasyonuna yönelik güncel gelişmeleri kapsamlı biçimde değerlendirmektedir. Çalışma, özellikle yüksek enerji yoğunluklu gizli ısı depolama malzemelerinin bina ısıl kütlesini artırarak yoğun talep dönemlerinde sistemin esnekliğini önemli ölçüde yükselttiğini ortaya koymaktadır.

### 3.3. Dış Cephe Isı Yalıtım Kompozit Sistemleri (ETICS) ve Bina Kabuğu Performansı

Bina enerji verimliliğinin pasif boyutunu oluşturan bina kabuğu performansı, aktif sistemlerin verimliliği kadar belirleyici bir rol üstlenmektedir. Parracha vd. (2023), Dış Cephe Isı Yalıtım Kompozit Sistemleri'ni (ETICS - External Thermal Insulation Composite Systems) kapsayan geniş çaplı derlemelerinde, bu sistemlerin anomali türlerini, performans parametrelerini, gereksinimlerini ve uzun dönem dayanıklılık özelliklerini sistematik biçimde sınıflandırmaktadır.

Şekil 6, EPS (Genleştirilmiş Polistiren) esaslı ETICS sistemlerinde yalıtım kalınlığına bağlı ısıl iletkenlik değışimini (U-değeri, Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup>) göstermektedir. Yalıtımsız bir duvar için tipik olarak 1,52 Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup> düzeyinde seyreden U-değeri,

12 cm EPS uygulamasıyla  $0,30 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  'ya kadar gerilemektedir. Avrupa Bina Enerji Performansı Direktifi'nin (EPBD) öngördüğü  $0,24 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$  hedefine ulaşmak için ise 14-16 cm yalıtım uygulaması gerekmektedir. Bu azalma, bina ısıtma yükü üzerinde doğrudan ve önemli etkiler doğurmaktadır.



**Şekil 6.** ETICS Sistemlerinde İzolasyon Kalınlığına Bağlı Isıl Performans (U-Değeri) (Parracha vd. (2023))

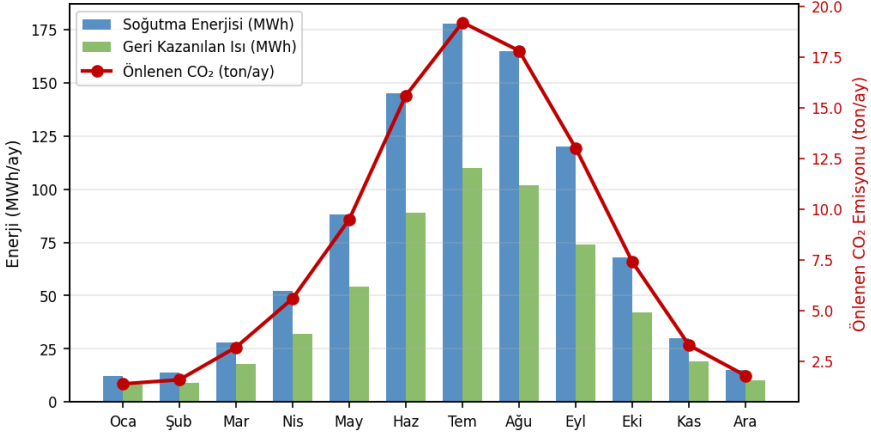
Dolores vd. (2022), bina sektöründe enerji dönüşümünün finansal boyutunu ele aldıkları çalışmalarında, yüksek performanslı yalıtım sistemlerine yapılan yatırımların dış finansman desteği olmaksızın dahi makul geri ödeme süreleri içinde karlılık sağlayabildiğini göstermektedir. Öte yandan Wise vd. (2025), Birleşik Krallık'ta bina yenilemesi konusundaki bilgi güçlükleri ve bu güçlüklerle yönelik çözüm yaklaşımlarını ele alan çalışmalarında, enerji verimliliği yatırımlarının önünde duran bilgisel asimetriye dikkat çekmektedir.

### 3.4. HVAC Sistemlerinde Isı Geri Kazanımı ve CO<sub>2</sub> Azaltımı

Isı geri kazanımı, özellikle soğutma yoğun uygulamalarda birincil enerji tüketimini ve karbon emisyonlarını azaltmada yüksek potansiyel barındıran bir stratejidir. Yu vd. (2024), otel HVAC sistemleri üzerine gerçekleştirdikleri uzun dönemli analizde soğutma talebinin ve atık ısı geri kazanım potansiyelinin aylık dağılımını kapsamlı biçimde incelemiştir.

Şekil 7, soğutma yoğunluğunun belirginleştiği Haziran-Ağustos döneminde ısı geri kazanım miktarının en yüksek değerlere ulaştığını göstermektedir. Bu dönemde sistem çıkışındaki atık ısının büyük bölümü sıcak su hazırlama amacıyla değerlendirilebilmekte olup böylece hem birincil enerji tasarrufu sağlanmakta hem de aylık CO<sub>2</sub> emisyonlarında kayda değer bir azaltım elde edilmektedir. Yu vd. (2024) bu bulguları yorumlarken, ısı geri kazanım optimizasyonunun yalnızca teknik bir mesele olmadığını, uzun vadeli şebeke

karbon yoğunluğu senaryolarıyla entegre edilmesi gereken stratejik bir yaklaşım gerektirdiğini de vurgulamaktadır.



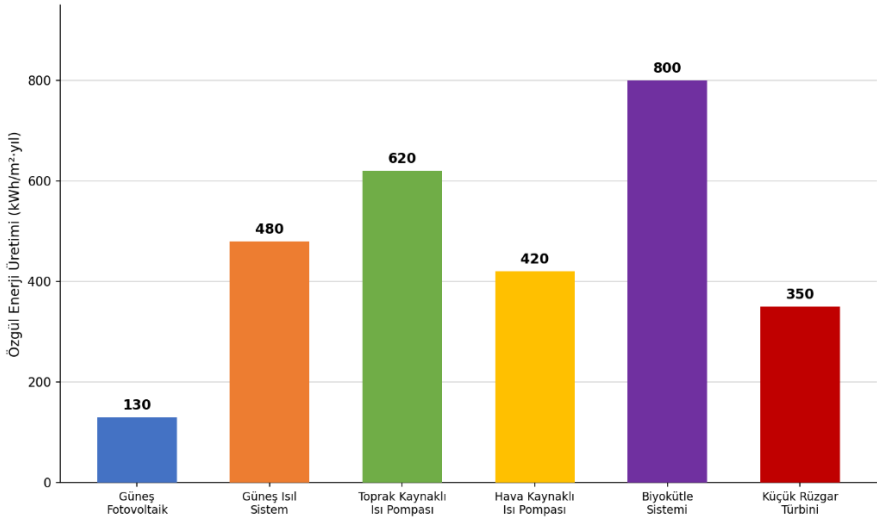
Şekil 7. Otel HVAC Sisteminde Yıllık Isı Geri Kazanımı ve Önlenen CO<sub>2</sub> Emisyonu Dağılımı (Yu vd. (2024))

## 4. YENİLENEBİLİR ENERJİ ENTEGRASYONU VE AKILLI SİSTEM UYGULAMALARI

### 4.1. Binalarda Yenilenebilir Enerji Seçenekleri

Isıl enerji verimliliğinin sağlanmasında aktif teknolojik çözümlerin yanı sıra yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu giderek daha merkezi bir konuma yükselmektedir. Rezaie vd. (2011), Kanada'nın üç büyük şehrini kapsayan vaka çalışmalarında güneş fotovoltaik, güneş ısı enerjisi, toprak kaynaklı ısı pompası, biyokütle ve rüzgâr türbini gibi farklı yenilenebilir teknolojilerin binalar için enerji üretim potansiyelini karşılaştırmalı biçimde değerlendirmektedir.

Şekil 8'de sunulan karşılaştırmada toprak kaynaklı ısı pompalarının ve biyokütle sistemlerinin birim alan başına özgül enerji üretiminde en yüksek değerlere ulaştığını ortaya koymaktadır. Bu iki teknoloji, sırasıyla mekanik enerji dönüşümü ve kimyasal enerji depolama avantajları sayesinde güneş enerjisi sistemleriyle kıyaslandığında iklim koşullarından daha az etkilenmekte olup yük karşılama kapasitesinde daha yüksek güvenilirlik sunmaktadır.



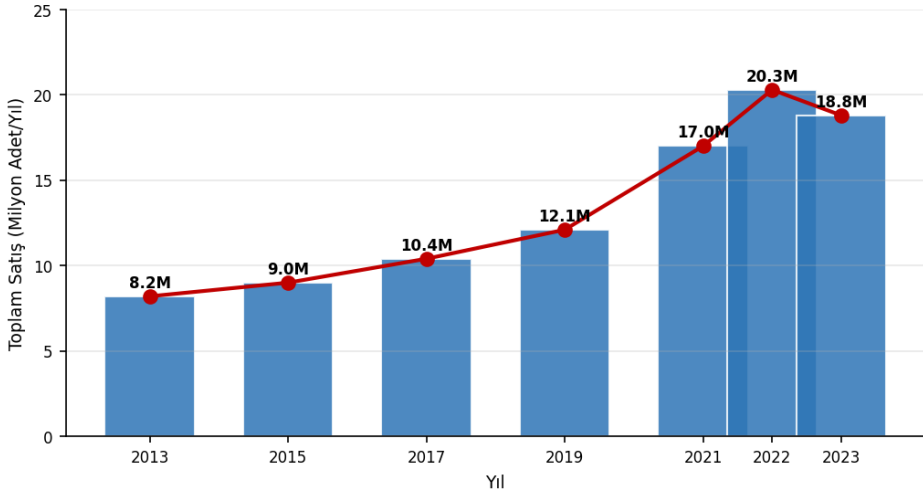
**Şekil 8. Binalarda Yenilenebilir Enerji Teknolojilerinin Özgül Enerji Üretimi Karşılaştırması (Rezaie vd. (2011))**

Xinyu vd. (2025), teknolojik yeniliğin Avrupa Birliği bünyesindeki yenilenebilir enerji dönüşümü üzerindeki belirleyici etkisini analiz etmektedir. Ayrıca, AR-GE yatırımları ile politika teşviklerinin birleşik ivmesiyle yenilenebilir teknolojilerin maliyet eğrilerinde önümüzdeki on yılda çarpıcı gerileme öngördüklerini vurgulamaktadır. Vujanović vd. (2021) ise sürdürülebilir ve enerji açısından verimli teknolojilerdeki ilerlemeyi çevresel etkilerle birlikte ele alan bütünsel analizlerinde, farklı sektör ve bölgelerde verimliliği artırma fırsatlarının mevcut uygulamalarla kıyaslandığında henüz değerlendirilmemiş önemli bir potansiyel barındırdığını ortaya koymuştur.

#### **4.2. Isı Pompası Teknolojileri ve Avrupa Piyasası**

Isı pompaları, doğal gazlı konvansiyonel ısıtma sistemlerinin karbon yoğunluğunu kökten azaltma potansiyeli taşıyan, elektrik enerjisiyle çalışan ve düşük sıcaklıklı bir kaynaktan (hava, toprak, su) yüksek sıcaklığa ısı transfer eden sistemlerdir. Olympios vd. (2025), Avrupa'daki ısı pompası teknolojisini kapsamlı biçimde değerlendirerek hem pazar büyümesini hem de teknoloji geliştirmedeki temel zorlukları sistematik olarak ele almaktadır.

Şekil 9, Avrupa'da yıllık ısı pompası satış hacminin 2013-2023 yılları arasındaki gelişimini göstermektedir. 2013 yılında yaklaşık 8,2 milyon üniteyle başlayan yıllık satışlar, 2021 enerji krizinin yarattığı ivmeyle 2022'de 20,3 milyon ünite zirvesine ulaşmıştır. Doğal gaz fiyatlarındaki oynaklık ve karbon fiyatlandırma mekanizmalarının güçlendirilmesi, tüketici tercihlerini yeniden şekillendirerek ısı pompası talebini yapısal olarak artırmaktadır.



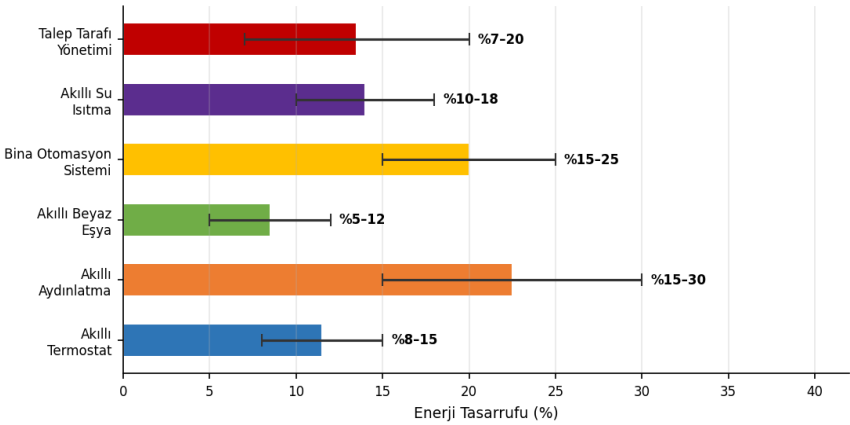
**Şekil 9.** Avrupa’da Isı Pompası Yıllık Satış Hacmi Gelişimi (2013–2023) (*Olympios vd. (2025)*)

Chitchyan (2025), ısı pompası benimsenmesinin önündeki engelleri ‘ödeme gücüne sahip’ hane halkları perspektifinden ele aldığı çalışmasında, finansal kapasitenin tek başına yeterli bir koşul oluşturmadığını ve ayrıca bilgiye erişim, montaj hizmetleri kalitesi ve uzun vadeli bakım güvencesi gibi faktörlerin de benimseme kararını belirleyici biçimde şekillendirdiğini göstermektedir.

#### 4.3. Akıllı Bina Teknolojileri ve Enerji Yönetim Sistemleri

Dijital dönüşümün enerji sistemleriyle kesiştiği alanda akıllı bina teknolojileri, enerji tüketim kalıplarını davranışsal düzlemde etkileyen güçlü araçlar olarak öne çıkmaktadır. Herrero vd. (2018), akıllı ev teknolojilerini gündelik yaşam bağlamında inceleyen çalışmalarında bu sistemlerin hane halkı enerji sorunlarını ne ölçüde çözdüğünü sorgulayan eleştirel bir perspektif geliştirmekte ve teknoloji odaklı yaklaşımların çoğunlukla davranışsal boyutları göz ardı ettiği sonucuna ulaşmaktadır.

Şekil 10, çeşitli akıllı ev teknolojilerinin enerji tüketimine katkısını tasarruf oranları çerçevesinde özetlemektedir. Akıllı aydınlatma sistemleri %15 ile %30 arasındaki değişken tasarruf aralığıyla en belirgin potansiyeli sunarken bina otomasyon sistemleri %15 ile %25 aralığında kapsamlı bir tasarruf sağlamaktadır. Akıllı termostatlar ise kurulum açısından en kolay benimsenen ve %8 ile %15 arasında değişen tasarruf oranlarıyla maliyet-etkinlik dengesinde güçlü bir konuma sahiptir.



**Şekil 10.** Akıllı Ev Teknolojilerinin Enerji Tüketimine Katkısı (Tasarruf Aralıkları) (Herrero vd. (2018))

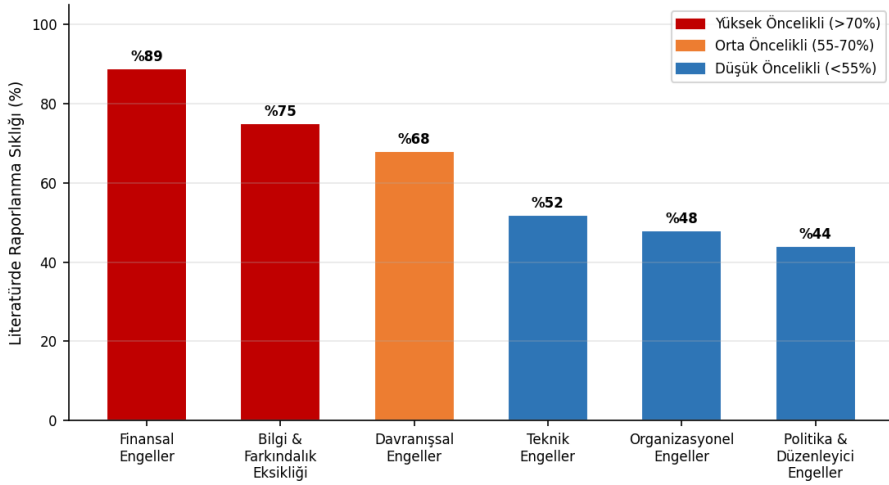
Herrero vd. (2018) bu bulguları değerlendirirken teknoloji tasarımcılarını, enerji verimliliği kazanımlarının somutlaştırılması için kullanıcı davranışlarıyla teknoloji arayüzlerini birlikte optimize eden bütünleşik sistem tasarımı yaklaşımına yönelmek konusunda uyarmaktadır. Bu saptama, akıllı teknolojilerin gerçek tasarruf potansiyelini serbest bırakabilmesi için ‘kullanıcı merkezli tasarım’ anlayışının teknik verimlilik standartları kadar belirleyici olduğuna işaret etmektedir.

## 5. ENERJİ VERİMLİLİĞİ POLİTİKALARI, ENGELLER VE STRATEJİK YAKLAŞIMLAR

### 5.1. Enerji Verimliliğinin Önündeki Sistemsel Engeller

Teknik potansiyelin çok gerisinde kalan gerçekleşme oranları, enerji verimliliği literatüründe ‘enerji verimliliği paradoksu’ olarak kavramsallaştırılmaktadır. Yeatts vd. (2017), binalarda enerji verimliliği teknolojilerinin benimsenmesinin önündeki engelleri ele alan sistematik derlemelerinde, mevcut literatürü kategori bazında inceleyerek finansal, bilgisel, davranışsal, teknik, organizasyonel ve politika-düzenleyici engellerin görece ağırlıklarını belirlemiştir.

Şekil 11’in de ortaya koyduğu üzere finansal engeller %89 raporlanma sıklığıyla ilk sırada yer alırken bunu %75 ile bilgi ve farkındalık eksikliği, %68 ile davranışsal engeller izlemektedir. Berkouwer ve Dean (2021), düşük gelirli topluluklarda enerji verimliliğinin benimsenmesinin önündeki engellere odaklandıkları çalışmalarında, finansal kısıtların katmanlı bir etki yarattığı ayrıca hem doğrudan yatırım kapasitesini hem de bilgi edinme fırsatlarını birlikte kısıtladığını göstermektedir.



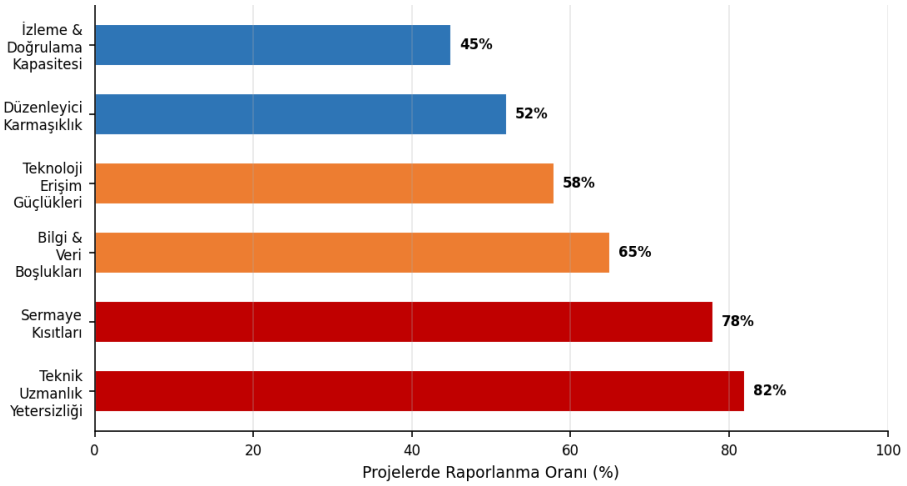
**Şekil 11.** Enerji Verimliliği Teknolojilerinin Benimsenmesindeki Engeller (Yeatts vd. (2017)- Chai ve Yeo (2012))

Chai ve Yeo (2012), bu karmaşık engel yapısını aşmaya yönelik sistem yaklaşımı perspektifinden bir kavramsal çerçeve geliştirmektedir. Çerçeve, enerji verimliliği önündeki birden fazla engelin aynı anda ve etkileşimli biçimde ele alınmasını önermektedir. Yazarların temel tezi, tek boyutlu politika müdahalelerinin (örneğin yalnızca finansman desteği ya da yalnızca bilgilendirme kampanyaları gibi) çok katmanlı engel yapısıyla baş etmede yetersiz kaldığıdır.

## 5.2. Küçük ve Orta Ölçekli İşletmelerde Enerji Verimliliği

Enerji verimliliği tartışmalarında görece geri planda kalan KOBİ sektörü, toplam endüstriyel enerji tüketiminin önemli bir bölümünü karşılamaktadır. Agrawal vd. (2023), Avrupa’da yedi farklı ülkedeki enerji verimliliği projelerinden elde ettikleri bulguları sentezleyerek KOBİ’lerin yaşadığı başlıca güçlükleri ve bu güçlüklerin aşılmasına yönelik öğrenilen dersleri sistematik biçimde ele almaktadır.

Şekil 12’de görüldüğü üzere, teknik uzmanlık yetersizliği ve sermaye kısıtları sırasıyla %82 ve %78 raporlanma oranlarıyla öne çıkan iki temel zorluk olarak belirlenmiştir. Çalışmada dikkat çeken önemli bir bulgu, farklı Avrupa bağlamlarında KOBİ profillerinin birbirinden belirgin biçimde farklılaşmasına karşın temel engel yapısının büyük ölçüde benzerlik göstermesidir. Bu durum, yalnızca finansmana değil aynı zamanda teknik danışmanlık altyapısının güçlendirilmesine yönelik politika müdahalelerinin zorunluluğunu ön plana çıkarmaktadır.



**Şekil 12.** Avrupa KOBİ’lerinde Enerji Verimliliği Zorlukları (Agrawal vd. (2023))

### 5.3. Politika Tasarımı ve Düzenleyici Araçlar

Enerji verimliliği politikası tasarımı, çok aktörlü ve çok hedefli bir optimizasyon problemi niteliği taşımaktadır. Varone ve Aebischer (2001), politika tasarımındaki zorlukları kapsamlı biçimde ele alan çalışmalarında enerji verimliliği politikasının üç temel boyutunu tanımlamaktadır. Bunlar sırasıyla, teknik-ekonomik boyut, davranışsal boyut ve kurumsal boyut olarak ifade edilmektedir. Her bir boyut, kendine özgü güçlükler ve buna karşılık gelen politika araçları gerektirmektedir.

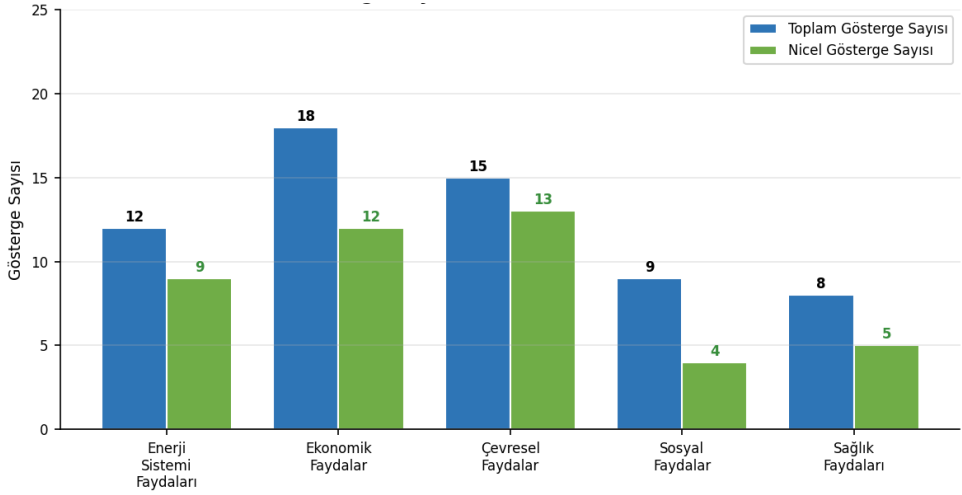
Enerji verimliliği politika araçları genel olarak üç kategoriye ayrılmaktadır:

1. Zorunlu araçlar (standartlar, yönetmelikler, enerji denetimleri),
2. Ekonomik araçlar (sübvansiyonlar, vergi teşvikleri, enerji fiyatlandırması, karbon vergisi); ve
3. Bilgi araçları (enerji etiketleme, farkındalık kampanyaları, kapasite geliştirme programları) biçimindedir.

Mevcut kanıtlar, bu araç setinin birbirleriyle uyumlu biçimde bir arada kullanıldığında etkinliğinin dramatik biçimde arttığını göstermektedir.

Reuter vd. (2020), enerji verimliliğinin yarattığı çoklu faydaların politika değerlendirmelerine dâhil edilmesini sağlayacak kapsamlı bir gösterge seti geliştirmektedir. Şekil 14’te sunulduğu üzere, bu gösterge seti beş ana fayda kategorisinde toplam 62 gösterge barındırmaktadır. Bu göstergelerin 43’ü doğrudan nicel olarak ölçülebilirken kalan 19’u nitel bir değerlendirme çerçevesi gerektirmektedir.





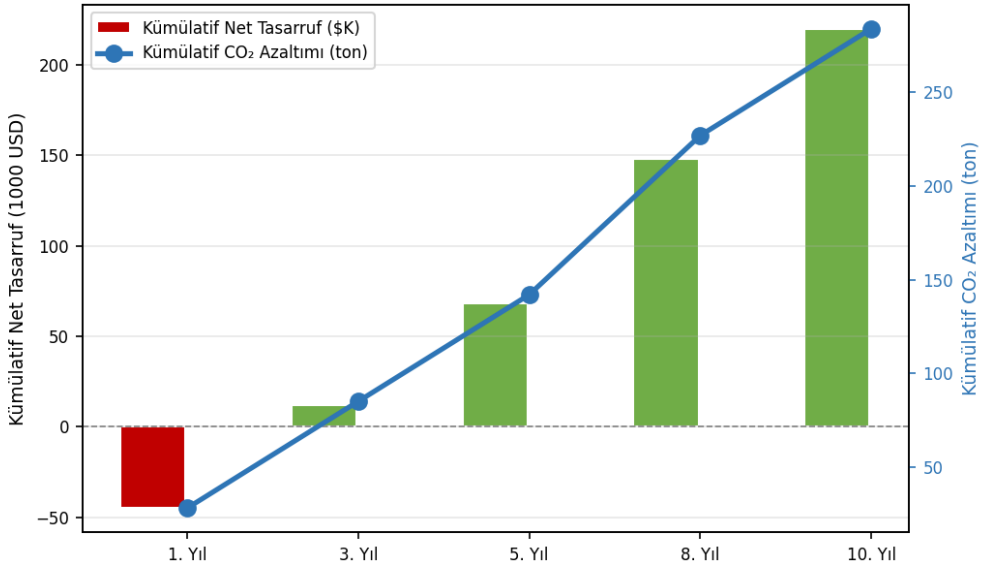
**Şekil 14.** Enerji Verimliliğinin Çoklu Faydaları: Kategori Başına Gösterge Sayısı (Reuter vd. (2020))

Bu çerçevenin politika tasarımı açısından taşıdığı en kritik anlam, enerji verimliliği yatırımlarının geleneksel enerji tasarrufu ve maliyet düşürme hesaplamalarıyla sınırlı tutulan fayda-maliyet analizlerinin, sağlık, konfor, üretkenlik ve istihdam gibi geniş kapsamlı sosyo-ekonomik faydaları yeterince yansıtmamasıdır. Bu yetersizlik, politika kararlarında verimliliğe yapılacak kamu yatırımlarının gerçek toplumsal karşılığının sistematik olarak küçümsenmesine yol açmaktadır.

#### 5.4. Toplum Tabanlı Yaklaşımlar ve Ekonomik Etki Analizi

Bireysel bina müdahalelerinin ötesinde toplum ölçeğinde yürütülen enerji verimliliği programları, ölçek ekonomileri ve kolektif kapasite oluşturma açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Choi vd. (2014), Ohio'nun Dayton kentinde uygulanan toplum tabanlı konut enerji verimliliği yatırım programını ekonomik ve çevresel etkiler bağlamında kapsamlı biçimde analiz etmektedir.

Şekil 13, yaklaşık 150 konuta yönelik yenileme programının on yıllık kümülatif ekonomik ve çevresel etkisini özetlemektedir. Programa dahil olan haneler, ilk yılda yatırım maliyetleri nedeniyle net negatif bir nakit akışı yaşamaktadır. Ancak üçüncü yıldan itibaren bu durum tersine dönmekte ve onuncu yılın sonunda kümülatif net tasarruf 220.000 USD'a ulaşmaktadır. Paralel olarak kümülatif CO<sub>2</sub> azaltımı on yıl içinde 284 tona ulaşmakla birlikte her iki eğri de yatırımın hem ekonomik hem çevresel açıdan güçlü bir gerekçeye sahip olduğunu somut biçimde doğrulamaktadır.



**Şekil 13.** Toplum Tabanlı Bina Enerji Verimliliği Yatırımının Kümülatif Ekonomik ve Çevresel Etkisi (Choi vd. (2014))

Bu bulgu, enerji verimliliği politikalarında toplum ölçekli programların bireysel teşvik mekanizmalarına kıyasla daha güçlü bir ekonomik gerekçeyle savunulabileceğine işaret etmektedir. Choi vd. (2014), programların etkinliğini artırmak için enerji tasarrufu garantisi (EPC-Energy Performance Contracting), döner fon mekanizmaları ve yerel finans kurumlarıyla ortaklık modellerinin geliştirilmesini önermektedir.

### 5.5. Eğitim, Kapasite Geliştirme ve Davranışsal Boyut

Tüm politika ve teknoloji çözümlerinin etkinliği nihayetinde bireylerin ve kurumların enerji verimliliğine ilişkin kararlarına bağlıdır. Zografakis vd. (2008), enerji verimliliği için etkin bir eğitim anlayışının nasıl tasarlanması gerektiğini sorgulayan çalışmalarında, Yunanistan bağlamında yürütülen bir müdahale programının sonuçlarını analiz etmektedir. Kalıcı davranış değişikliğinin sağlanabilmesi için eğitim içeriklerinin farklı hedef kitlelerin özelliklerine (yaş, meslek, yaşam bağlamı gibi) uyarlanmasının zorunluluğunu vurgulamaktadır.

Herrero vd. (2018), akıllı teknolojilerin hane halkı enerji sorunlarını çözüp çözmediğini sorgulayan eleştirel analizlerinde, teknoloji benimsemesinin tek başına yeterli olmadığını göstermektedir. Ayrıca bireysel alışkanlıkların, sosyal normların ve kullanıcı arayüzü tasarımının da enerji tüketimine belirleyici katkı yaptığını ortaya koymaktadır. Wise vd. (2025) ise Birleşik Krallık'ta hane halkları, yenileme uzmanları ve yerel politika yapımcılar arasındaki bilgi asimetrisinin enerji verimliliği dönüşümünün önündeki yapısal engellerden biri olduğunu vurgulamaktadır.

Tüm bu bulguların ortak paydası, enerji verimliliğinin kısa vadeli müdahalelerle değil uzun soluklu kapasite geliştirme ve kurum inşası stratejileriyle hayata geçirilebileceğidir. Agrawal vd. (2023), bu çerçevede özellikle KOBİ'lere yönelik sektör bazlı enerji verimliliği ağlarının kurulmasını, bilgi transferini ve uzman danışmanlık servislerinin erişilebilirliğini ön plana çıkaran politika önerileri geliştirmektedir.

## 6. SONUÇ

Isıl sistemlerde enerji verimliliğini termodinamik temellerden yenilenebilir enerji entegrasyonuna, teknoloji yeniliklerinden politika tasarımına uzanan geniş bir perspektiften değerlendirmeyi amaçlamıştır. Küresel enerji sistemlerinin içinde bulunduğu dönüşüm baskısı, ısı sistem verimliliğini bir teknik seçenek olmaktan çıkarıp iklim taahhütlerinin hayata geçirilmesi için zorunlu bir strateji düzeyine yükseltmektedir.

Çalışmanın birinci başlığında, WEC 2019 senaryoları, enerji verimliliği politikalarının sonucun tayin edici bir belirleyeni olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Kober vd. (2020)'nin verileriyle görselleştirilen senaryo analizi, yoğun verimlilik politikaları ve temiz enerji geçişini öngören Modern Jazz senaryosunun bina ve endüstri sektörlerinde köklü bir dönüşüm gerektirdiğini ve 2060 yılı birincil enerji talebini mevcut eğilime göre yaklaşık %40 oranında kısıtladığını göstermektedir.

İkinci başlıkta, ele alınan verimlilik metrikleri, COP ve EER gibi göstergelerin teknik tasarım kararları ile politika değerlendirmelerindeki merkezi işlevini vurgulamaktadır. Alves vd. (2016) ve Reuter vd. (2020)'nin katkıları, verimlilik ölçümünün yalnızca doğrudan enerji parametrelerini değil, sağlık, konfor ve sosyal eşitlik gibi çok boyutlu faydaları da kapsaması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Üçüncü ve dördüncü başlıklarda, teknoloji çözümleri ile birbirini tamamlayan bir bütün oluşturmaktadır. HVAC verimliliğindeki artışlar (Alves vd., 2016; Olatunde vd., 2024), ısı enerji depolama teknolojilerindeki yenilikler (Eze, 2025; Eze vd., 2024; Qin vd., 2021), bina dış cephe yalıtımı ve bina kabuğu performansı (Parracha vd., 2023), yenilenebilir enerji entegrasyonu (Rezaie vd., 2011; Xinyu vd., 2025) ve akıllı bina sistemleri (Herrero vd., 2018; Nguyen vd., 2023), birbirini güçlendiren bileşenlerden oluşan entegre bir verimliliğin alt sistemleridir.

Beşinci başlık, teknik çözümlerin hayata geçirilmesinin önünde duran karmaşık engel yapısına dikkat çekmektedir. Yeatts vd. (2017)'nin sistematik derlemesi, finansal ve bilgisel engellerin ağırlığını somut biçimde ortaya koyarken Choi vd. (2014)'nin toplum bazlı analizi, uzun vadeli yatırımların güçlü

bir ekonomik gerekçeye sahip olduğunu kanıtlamaktadır. Agrawal vd. (2023) ve Varone ve Aebischer (2001)'nin çalışmaları, verimli bir politika ortamı yaratmanın teknik çözümler kadar belirleyici olduğunu bir kez daha doğrulamaktadır.

Isıl sistemlerde enerji verimliliğinin tam potansiyelini açığa çıkarmak için şu alanlarda çok boyutlu ve koordineli bir eylem programına gereksinim duyulmaktadır. Bunlar,

- 1- Teknik standartların güncellenmesi ve zorlanması,
- 2- Düşük maliyetli finansman mekanizmalarının yaygınlaştırılması,
- 3- Enerji verimliliği eğitiminin kapasite geliştirme programlarıyla bütünleştirilmesi,
- 4- Akıllı sistemler ve ısı pompası teknolojilerine yönelik AR-GE yatırımlarının artırılması ve
- 5- Enerji verimliliğinin çoklu faydalarının politika değerlendirme süreçlerine dahil edilmesi.

Bu bütüncül yaklaşımlarla, hem iklim hedefleriyle hem de ekonomik kalkınma öncelikleriyle güçlü bir uyum içindedir.

## KAYNAKÇA

- Agrawal, R., De Tommasi, L., Lyons, P., Zaroni, S., Papagiannis, G. K., Karakosta, C., ... Güemes, E. L. (2023). Challenges and opportunities for improving energy efficiency in SMEs: Learnings from seven European projects. *Energy Efficiency*, 16(3), 17.
- Alves, O., Monteiro, E., Brito, P., & Romano, P. (2016). Measurement and classification of energy efficiency in HVAC systems. *Energy and Buildings*, 130, 408-419.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). (2021). *ASHRAE handbook – Fundamentals*. Atlanta, GA: ASHRAE.
- Berkouwer, S., & Dean, J. (2021). Barriers to energy efficiency adoption in low-income communities. Philadelphia, PA: Kleinman Center for Energy Policy.
- Chai, K. H., & Yeo, C. (2012). Overcoming energy efficiency barriers through systems approach - A conceptual framework. *Energy Policy*, 46, 460-472.
- Cheekatamarla, P. (2020). Energy efficient building technologies: Challenges and opportunities. *American Chemical Society SciMeetings*, 1(2).
- Chitchyan, R. (2025). Overcoming barriers to heat pump adoption among able-to-pay households. *Energy Policy*, 206, 114660.
- Choi, J. K., Morrison, D., Hallinan, K. P., & Brecha, R. J. (2014). Economic and environmental impacts of community-based residential building energy efficiency investment. *Energy*, 78, 877-886.
- Dolores, L., Macchiaroli, M., & De Mare, G. (2022). Financial impacts of the energy transition in housing. *Sustainability*, 14(9), 4876.
- Eze, V. H. U. (2025). Innovations in thermal energy systems: Bridging traditional and emerging technologies for sustainable energy solutions. *Frontiers in Thermal Engineering*, 5, 1654815.
- Eze, V. H. U., Tamball, J. S., Uzoma, O. F., Sarah, I., Robert, O., & Okafor, W. O. (2024). Advancements in energy efficiency technologies for thermal systems: A comprehensive review. *INOSR Applied Sciences*, 12(1), 1-20.
- Herrero, S. T., Nicholls, L., & Strengers, Y. (2018). Smart home technologies in everyday life: Do they address key energy challenges in households? *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 31, 65-70.
- Kanoğlu, M., Çengel, Y. A., & Dinçer, İ. (2012). *Efficiency evaluation of energy systems*. New York, NY: Springer Science & Business Media.
- Kober, T., Schiffer, H. W., Densing, M., & Panos, E. (2020). Global energy perspectives to 2060 - WEC's World Energy Scenarios 2019. *Energy Strategy Reviews*, 31, 100523.

- Nguyen, A. T., Pham, D. H., Oo, B. L., Santamouris, M., Ahn, Y., & Lim, B. T. H. (2023). Modelling building HVAC control strategies using a deep reinforcement learning approach. *Energy and Buildings*, 280, 112705.
- Olatunde, T. M., Okwandu, A. C., Akande, D. O., & Sikhakhane, Z. Q. (2024). Review of energy-efficient HVAC technologies for sustainable buildings. *International Journal of Science and Technology Research Archive*, 6(2), 12-20.
- Olympios, A. V., Justo Alonso, M., & Pantaleo, A. M. (2025). Heat pumps in Europe: Perspectives and innovation challenges. *Progress in Energy*, 7(3), 032004.
- Parracha, J. L., Veiga, R., Flores-Colen, I., & Nunes, L. (2023). Toward the sustainable and efficient use of external thermal insulation composite systems (ETICS): A comprehensive review. *Buildings*, 13(7), 1664.
- Patterson, M. K. (2012). Energy efficiency metrics. In M. K. Patterson (Ed.), *Energy efficient thermal management of data centers* (ss. 237–271). Boston, MA: Springer US.
- Qin, Z., Li, M., Flohn, J., & Hu, Y. (2021). Thermal management materials for energy-efficient and sustainable future buildings. *Chemical Communications*, 57(92), 12236-12253.
- Reuter, M., Patel, M. K., Eichhammer, W., Lapillonne, B., & Pollier, K. (2020). A comprehensive indicator set for measuring multiple benefits of energy efficiency. *Energy Policy*, 139, 111284.
- Rezaie, B., Esmailzadeh, E., & Dinçer, İ. (2011). Renewable energy options for buildings: Case studies. *Energy and Buildings*, 43(1), 56-65.
- Varone, F., & Aebischer, B. (2001). Energy efficiency: The challenges of policy design. *Energy Policy*, 29(8), 615-629.
- Vujanović, M., Wang, Q., Mohsen, M., Duić, N., & Yan, J. (2021). Recent progress in sustainable energy-efficient technologies and environmental impacts on energy systems. *Applied Energy*, 283, 116280.
- Wise, F., Gillich, A., & Palmer, P. (2025). Retrofit information challenges and potential solutions: Perspectives of households, retrofit professionals and local policy makers in the United Kingdom. *Energy Research & Social Science*, 119, 103866.
- Xinyu, W., Haoran, L., & Khan, K. (2025). Innovation in technology: A game changer for renewable energy in the European Union? *Natural Resources Forum*, 49(2), 1462-1477.
- Yeatts, D. E., Auden, D., Cooksey, C., & Chen, C. F. (2017). A systematic review of strategies for overcoming the barriers to energy-efficient technologies in buildings. *Energy Research & Social Science*, 32, 76-85.

- Yu, F. W., Ho, W. T., & Wong, C. F. J. (2024). Long-term analysis of cooling demand and heat recovery in hotel HVAC systems: Implications for sustainable chiller design and operation to reduce CO<sub>2</sub> emissions. *Energy and Buildings*, 321, 114657.
- Zografakis, N., Menegaki, A. N., & Tsagarakis, K. P. (2008). Effective education for energy efficiency. *Energy Policy*, 36(8), 3226–3232.



## *BÖLÜM 7*



# **Geri Dönüştürülmüş Petg Filamentlerin Mekanik Özellikleri ve Katmanlı İmalatta Döngüsel Ekonomi**

---

*Uçan Karakılınç<sup>1</sup>*

## **1. GİRİŞ**

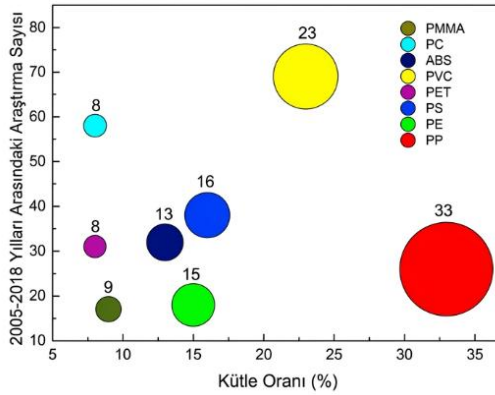
20 yy. sonlarından itibaren talaşlı imalat, enjeksiyon kalıplama, döküm gibi geleneksel imalat yöntemlerinin yerini hızla almaya başlayan eklemeli imalat (Eİ) teknolojileri, eriyik biriktirme modellemesi olan (FDM/FFF) teknoloji ile endüstri 4.0 dönüşümünde yer alır. Eİ, kişiye özel tasarım ve imalatının yapılması, karmaşık geometrili ürünlerin tek bir süreçle imalatı, malzeme israfını azaltma, hızlı protipleme işleminin yapılması vb. gibi avantajları sayesinde geleneksel talaşlı imalat yöntemlerine kıyasla dünya çapında hızla benimsenmiştir (Gibson ve ark., 2021). Eİ yöntemi, imalat sürecinde kullanılan malzeme israfını azaltma ya da en aza indirme potansiyellerinden dolayı teorikte çevre dostu ve ekonomik sistemler olarak belirtilse de son çeyrek yüzyılda masaüstü, ev tipi ve endüstriyel 3D yazıcıların dünya genelinde sayısal olarak artışı bir sürdürülebilirlik krizini oluşturmuştur (Dorigato, 2021). Despeisse ve ark., (2017), Dorigato, (2021) yaptıkları çalışmalarda, FDM üretim sürecinde, parça geometrisindeki çarpılmalar nedeniyle oluşan hatalı baskılar, kullanılan destek (support) yapıları, etek(skirt) ve sal (raft) gibi yardımcı baskı unsurları, prototip denemeleri ve kullanım ömrünü tamamlamış prototipler ürünler, mekanik ya da boyutsal tolerans hataları nedeniyle çöpe giden ıskarta parçalar dünya genelinde tonlarca polimerik katı atık sorunu oluşturmakta olduğunu rapor etmişlerdir. Buna paralel olarak kısıtlı bulunan ham madde kaynaklarının tükenmesi, çevre kirliliğine önlem olarak işlevselliğine kaybeden yüksek katma değer içeren maddelerin doğrusal ekonomi modelinin "al-kullan-at" prensibi, yerini malzemenin sürekli döndürülmesini amaçlayan döngüsel ekonomi (circular economy) modeline bırakmak zorundadır (Geissdoerfer ve ark., 2017; Shanmugam ve ark., 2023).

FDM teknolojisinde yaygın olarak kullanılan termoplastik filamentler arasında ABS (akrilonitril bütadien stiren) PLA (polilaktik asit), ve PETG (polietilen tereftalat glikol); mekanik özellikleri, baskı kolaylığı ve ekonomik

---

<sup>1</sup> Öğr. Gör. Dr., Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Bilgisayar Programcılığı, Orcid No: 0000-0001-7782-3580

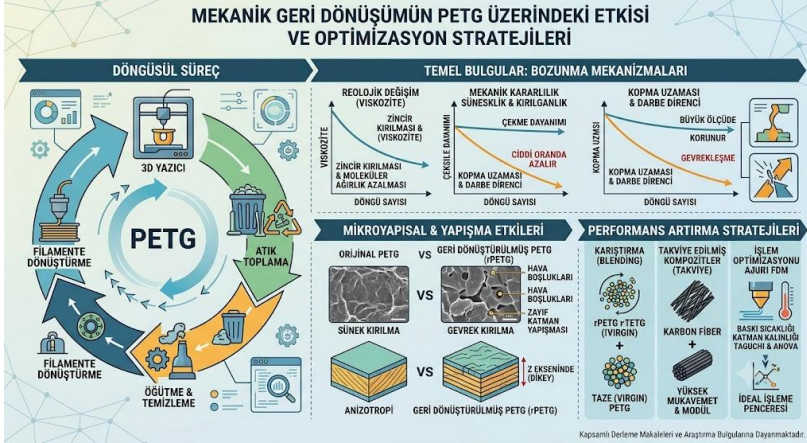
uygunlukları açısından öne çıkmaktadır. Ancak son yıllarda, diğer iki malzemenin üstün özelliklerini kendinde toplayan (PETG), amorf morfolojisi ve gelişmiş endüstriyel verimlilik özellikleriyle diğerlerinden ayrılmaktadır (Szykiedans ve Credo, 2016). PETG; işlevsel prototipler, mekanik parçalar ve ambalaj endüstrisi için, ABS kadar dayanıklı ve PLA kadar kolay basılabilir olması vazgeçilmez bir seçenek haline getirmiştir (Latko-Durałek ve ark., 2019). PETG'nin bu geniş kullanımından dolayı, üretim esnasındaki (post-industrial) ve kullanım sonrasında (post-consumer) oluşan atık miktarını da artması kaçınılmazdır. Şekil 1'de 2005-2018 yılları arasında dünyadaki plastik atıkların araştırma sayısı ve kütle oranını gösteren bir resim görülmektedir.



**Şekil 1.** Plastik Atıklardaki Farklı Polimer Matrislerin Bağlı Kütle Oranı ve 2005-2018 Yılları Arasında Bu Plastikler Üzerine Yapılan Araştırmaların Sayısı (Wang ve ark., 2019)

Üç boyutlu yazıcı teknolojilerinde kullanılan termoplastik malzemeler, geri dönüşüme uygun olması ve endüstride birçok işlemde kullanılmasından dolayı doğrudan temin yönteminden başlayarak geri dönüşüm ekonomisine çok uygundur. Bu sebeple endüstride ve günlük hayatımızda kullanılan polimetrik atıklar mekanik geri dönüşüm ile tekrardan filament yapılarak maliyet azaltılmakta ve çevresel sorun olan küresel ısınmaya sebep olan karbonu önemli ölçüde azaltmaktadır (Cruz Sanchez ve ark., 2020). PETG'nin geri dönüşüm işleminin sürdürülebilirliği açısından termoplastik yapısından dolayı eritilmeye ve tekrardan ekstrüzyona yapılmaya uygun malzeme olduğu için Eİ önemli bir ham madde kaynağıdır (Cruz Sanchez ve ark., 2020). Geri dönüştürülmüş rPETG filamentlerin yapımı, saf PETG üretimine göre enerji tüketimini %60-%80 oranında indirmekte ve sera gazı emisyonlarını azaltmaktadır (Cruz ve Santana, 2022). Fakat buna karşılık mekanik geri dönüşümün oluşturduğu en büyük dezavantaj, her ergitilmeden sonra tekrardan ekstrüzyon çevrimine sokmanın polimerde oluşan termo-mekanik degradasyondur. Polimerlerin

mekanik geri dönüşümlerin her defasında, malzemede yapısında oluşan termal ve mekanik gerilmelerden kaynaklanan polimer zincirlerinde termo-mekanik bozunmalar olmaktadır. Her dönüşüm döngüsünde bir öncekine göre zincir uzunluklarının kısalması, malzemenin viskozitesini, camsı geçiş sıcaklığını ve en kritik olarak son ürünün işlem etkisini temel olarak etkilemektedir (Carrasco ve ark., 2001).



**Şekil 2.** rPETG malzemenin mekanik geri dönüşüm ve optimizasyon süreci

Literatür araştırmalarında rPETG filamentlerin mekanik özellikleri çekme dayanımı, eğme mukavemeti, darbe direnci ve katmanlar arası yapışma kalitesi üzerinde farklı veriler vardır. Babagowda ve ark. (2023) ve Exconde ve ark. (2019) yaptıkları araştırmalarında, belirli oranlarda geri dönüştürülmüş malzeme veya atık su şişesinden dönüştürülen katkının, oluşturulan rPETG malzemede mekanik özellikleri çok fazla düşürmediğini, dahası kabul edilmiş olan baskı parametreleriyle benzerlik göstererek mukavemet değerlerine erişebileceğini iddia etmektedirler. Ancak çok fazla geri dönüşü sürecine uğradığında malzeme, ısı geçmişi yığılmasından dolayı katman bağlarının zayıfladığını belirten çalışmalarda vardır.

Bu çalışma, geri dönüştürülmüş rPETG'nin Eİ'daki performansı ve saf PETG ile mekanik özelliklerinin kıyaslanması, döngüsel ekonomi içerisindeki rolü detaylı şekilde incelenecektir. Buna paralel olarak; geri dönüşüm süreçlerinin polimer kimyasına etkileri ve nihai parçaların çekme ve eğme, darbe dayanımları literatür verileri ışığında bütüncül bir çerçevede incelemektedir. Tekrardan oluşan filamentin üretim parametrelerinin son ürün verimliliğindeki etkileri incelenecektir. Ayrıca eklemeli imalat yazıcı atıklarının geri kazanımlarının ekonominin döngüsel modeli çerçevesinde değerlendirilerek, bundan sonra yapılacak araştırma ve endüstriyel uygulama potansiyelleri için bir fikir belirtmesi hedeflenmektedir.

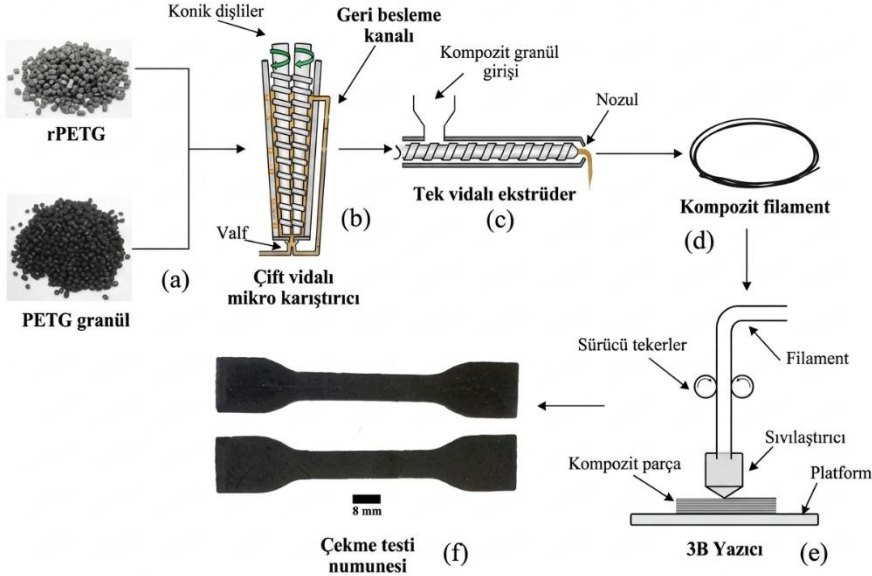
## 2. PETG'NİN KİMYASAL YAPISI VE İŞLENEBİLİRLİĞİ

PETG; PET yapısına %10-35 aralığında CHDM monomerinin dahil edilmesi sonucu ortaya çıkan, düzensiz (amorfl) moleküler dizilime sahip bir polyeester türüdür. CHDM'nin halkalı yapısı, zincir paketlenmesini engelleyerek kristalizasyonu baskılar ve malzemeyi şeffaf, tok ve kolay işlenebilir kılar (Jiang ve ark., 2021). Yapısındaki bu özellik, FDM teknolojisi işlemlerinde, en az miktarda iç gerilme ve katmanlar arasında etkin yapışması olarak kendini gösterir. PETG'nin termal özellikleri olarak; T<sub>g</sub> (Camsı Geçiş Sıcaklığı) değeri 78-82°C arasında, erime aralığı belirgin olmamakla birlikte akış başlangıcı 220-235°C'dir. Saf PETG'nin eriyik akış indeksi (MFI) genellikle 8-12 g/10dk, (230°C/2,16 kg) aralığındadır ve bu değer, FDM nozül geçişi için uygun viskozite şartını sağlar (Cruz Sanchez ve ark., 2020). Bununla birlikte, malzeme üst üste geri dönüştürüldüğünde yüksek ısıya maruz kalır. Bu ısısal etki, yapıdaki ester bağlarının parçalanmasına ve oksijenli ortamda zincirlerin kopmasına neden olur. Sonuç olarak malzemenin akışkanlığı (MFI) artarken, ağıdalı yapısı (viskozitesi) azalır. Akışkanlıktaki bu dengesizlik, malzeme akışının kararlılığını bozarak üç boyutlu imalat işlemini zorlaştırır. Bunun yanında katmanların birbiriyle kaynaşmasını engelleyerek parçanın mukavemetini düşürebilir (Zander ve ark., 2021).

PETG'nin akış özellikleri, FDM de başarılı bir imalat için kritik önem oluşturur. Kaliteli bir baskı kalitesi için filament düzgün şekilde beslemek, ergiyen plastiğin homojen olması ve nozülden çıkışta şişme kontrolü açısından kritik rol oynar. PETG, üzerine uygulanan kuvvet fazlaştıkça daha akışkan hale gelmektedir. Buna kayma incilmesi denir ve "n" ile ifade edilir. Saf PETG'de bu değer ortalama 0,3-0,4 arasındadır. Malzeme her geri dönüştürüldüğünde, bu n değeri 0,4'ten daha yüksek değer alır. Bu ifade, malzemenin su gibi daha düz ve sıradan aktığını belirtir. Bu işlem için kötü bir durumdur, plastik zincirlerin kısaldığını gösterir. Bunun sonucunda baskı kalitesinin düşmesine, katmanlar arası yapışmasının azalması, yüzey kalitesi ve boyutsal hassasiyetin kaybolduğu anlamına gelmektedir (Wang ve ark., 2023). Geri dönüştürülmüş PETG'nin akış yapısını koruyabilmek için üretim sırasında üç kritik adım zorunlu hale gelir. İlk olarak plastik, içinde neredeyse hiç nem kalmayacak şekilde çok sıkı kurutulması, ikincisi, gaz oluşumunu engelleyen vakumlu eritme yöntemi ve son olarak kısılan plastik bağlarını bir araya getiren zincir uzatıcı kimyasallar eklenmelidir. Böylelikle plastiğin akış kalitesi korunabilmektedir (Vidakis ve ark., 2022).

PETG ile uygun bir baskı yapabilmek için gereken sıcaklık, PLA'ya göre daha sıcak olması gerekirken, ABS kadar yüksek sıcaklık gerektirmez. Bununla birlikte, ABS'ye göre daha az zararlı gaz çıkarması ve baskı işlemi sırasında "çarpılma" (warping) hiç yok denecek kadar azdır. Tablaya iyi yapışır ve köşeler kalkmaz. Bunun yanında zayıf yön olarak, havadaki nemi emerek bünyesine alır. Bu durum malzemenin içinde kimyasal bir bozulmaya yol açarak, yapısındaki

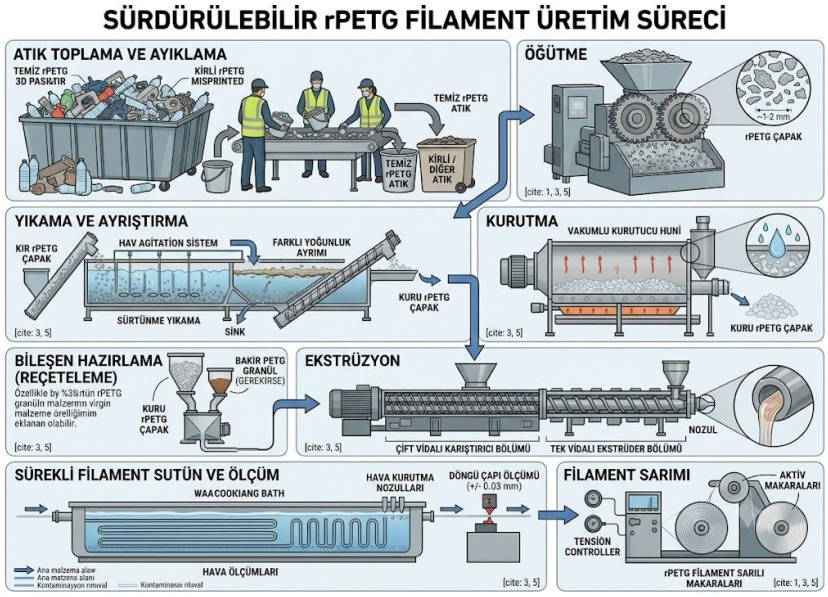
plastik zincirler parçalanır. Tabiki, rPETG'de bu sorun çok daha büyüktür. Çünkü atık plastikler toplama esnasında ve depolanmasında çok daha fazla neme maruz kalırlar. Bu nedenle yeniden filament imal etmeden önce mutlaka kurutmak gerekmektedir. Yapılan çalışmalarda, mekanik performansının iyi olması için, PETG'yi 65-70 derece sıcaklıkta 4-6 saat kurutmanın iyi sonuçlar verdiğini raporlamışlardır. Bu işlemlerle, baskı sırasında baloncuklar, çatlama ve zayıf katmanlar oluşumunun önüne geçilmiş olunur(Katti ve ark., 2022; ISO 20753, 2018).



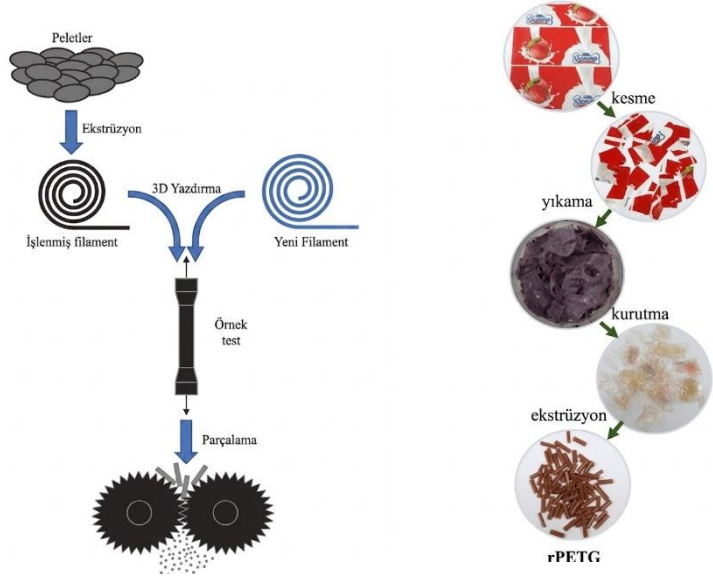
**Şekil 3.** Kompozit filament yapımı süreci ve üç boyutlu baskı, (a)Granül haline dönüştürülmüş rPETG ve PETG resmi, (b) rPETG ve PETG'nin çift vidalı ekstrüder ile homojen karıştırılması, (c) rPETG/PETG kompozit yapının tek vidalı ekstrüder ile filament haline getirilmesi, (d) rPETG den bir örnek, (e) 3B yazıcıda baskı işlemi, (f) İmalatı yapılan standart ölçüdeki çekme testi numunesi örneği (Sezer ve ark., 2018)

### 3. GERİ DÖNÜŞÜM YÖNTEMLERİ VE FİLAMANT ÜRETİM SÜREÇLERİ

rPETG filament üretimi, temel olarak mekanik geri dönüşüm hattı üzerinden gerçekleştirilir. Süreç; atık toplama, ayıklama, öğütme, yıkama, kurutma, ekstrüzyon ve filament sarımı aşamalarından oluşur (Hopewell ve ark., 2021). Üretim aşamasındaki her adım, yapılan filamentin mukavemetini ve ısıya karşı direncini doğrudan etkiler.



**Şekil 4.** rPETG Filamentin Geri Dönüşüm Süreci



**Şekil 5.** (a) Sürdürülebilir PETG elementin kullanım döngüsü, (b) Geri dönüşüm sürecinde malzemeye uygulanan aşamalar ( Dohan ve ark., 2024, Latko-Durałek ve ark., 2019)

### 3.1. Atık Kaynakları ve Ayıklama

FDM atıkları farklı plastik kaynaklardan gelir. Bunlar genellikle destek baskı sırasında kullanılan destek parçaları, hatalı veya başarısız çıkmış baskılar, deneme parçaları ve fabrikalardan çıkan hurdalar oluşur. Ancak bu atıkları geri dönüştürmek istediğimizde en büyük sorun, farklı plastik türlerinin birbirine karışmış olmasıdır. Örneğin PETG, PLA, ABS veya TPU gibi diğer plastiklerle karışabilir. Bu karışım ciddi problemler oluşturur. Çünkü her plastiğin erime sıcaklığı farklıdır. Birisi 180<sup>0</sup> erirken, diğeri 240<sup>0</sup> derecede erir. Ayrıca bu plastikler kimyasal olarak uyumsuzdur. Sonuçta malzeme içinde ayrılmalar ve zayıf noktalar oluşur. Bu yüzden geri dönüşüm öncesinde atık plastikleri dikkatle ayırmak gerekir. Ayırma işlemi için iki ana yöntem kullanılır. Birincisi, kızılötesi ışık kullanan bir sistem olan NIR spektroskopidir. Bu sistem tıpkı parmak izi okuyucu gibi çalışır. Her plastik için farklı bir "imza" verir ve makine bunu okuyarak plastik türlerini tanır ve ayırır. İkinci yöntem ise yoğunluk bazlı ayırmadır. Bu yöntemde plastikler su veya özel sıvılarda yüzdürülür. Hafif olanlar yukarıda askıda kalırken, ağır olanlar dibе batır ve böylece birbirinden ayrılırlar. Bu ayırma işlemlerinin hedefi, % 95'in üzerinde saflık elde etmektir. Yani 100 gram malzemenin 95 gramından fazlası saf PETG olmalıdır. Ancak bu düzeyde bir saflık sağlandığında kaliteli filament üretilebilir. Atık plastikleri toplamak kolay görünse de, içindeki farklı türleri birbirinden ayırmak zor ve kritik bir süreçtir. Aksi halde geri dönüştürülmüş malzeme kullanılamaz hale gelir ve tüm geri dönüşüm çabası boşa gider. (European Commission, 2023). Karışık atıklarda rPETG'nin çekme dayanımı %30'a varan oranlarda düşebilmektedir (Cruz Sanchez ve ark.,2020).

### 3.2. Öğütme ve Yıkama

Öğütme aşamasında atık plastikler, makine ilerlemesine uygun olması ve erime sırasında pürüzsüz ve sorunsuz bir yapı oluşturması için 3-8 milimetrelik parçalara ayrılır. Parçalar sonrasında üzerlerindeki yağ ve kirden arındırmak amacıyla yıkanır, ancak bu işlem PETG'nin nemi içine hapsetmesine neden olur. Nemli plastik, imal edilecek parçada baloncuk ve çatlaklara yol açabileceği için iki kademeli bir kurutma işleminden geçirilmelidir. Öncelikle santrifüj yardımıyla parçacıkların yüzeyindeki su uzaklaştırılır, daha sonra fırınlama aşamasında malzemenin içine girmiş olan nem tamamen yok edilir. (Zander ve ark., 2021).

### 3.3. Ekstrüzyon ve Filament Üretimi

Geri dönüştürülmüş PETG'den kaliteli filament üretimi için genellikle çift vidalı ekstrüderler (ekstrüzyon makinesi) tercih edilir. Sistemin vida yapısı, malzemenin beslenmesi, sıkıştırılması ve ölçülü bir şekilde ilerletilmesi süreçlerini kapsayan üç aşamalı bir düzende çalışır. Bu işlemde makinenin farklı bölgelerinde 210-235°C arasında sıcaklık ayarlanır, çünkü yüksek sıcaklık plastiğin akışkanlığını azaltır ve bozulma riskini artırır. Vakum sistemi ise, erime

esnasında ortaya çıkan nem ve gaz kalıntılarını emerek uzaklaştırır. Bu olay yapılan filamentin içerisinde baloncuk ve boşluk oluşmasını engelleyerek ürünün zayıflamasını önler (Vidakis ve ark.,2022). Üretilen filamentin çap kalınlığı her yerinde dairesel formda milimetrik olarak simetrik olmalıdır. Aksi halde oluşabilecek değişik formlar yüzey bozukluklarına, yazıcıda tıkanmalara ya da düzensiz akış nedeniyle baskı hatalarına yol açar(ISO/ASTM 52900, 2021).

### **3.4. Katkı Maddeleri ve Modifikasyon**

Plastikler malzemeler, birkaç kez geri dönüştürüldüğünde iç yapısındaki zincir bağların koparak zayıflatır. Bunun düzeltilmesi için toplam malzemenin % 0,5-1,5'i kadar özel olarak onarıcı/bağlayıcı katkı maddesi katılır. Böylece kırılmış zincirleri tekrar birbirine bağlayarak molekül yapısını onarır. Yapılan araştırmalarda PETG'nin çekme dayanımı %12-18, darbe tokluğu % 20-25 arttırarak daha dayanıklı hale geldiğinin göstermektedir (Wang ve ark., 2023). rPETG'ye kristalleştirici veya nano kil gibi katkı maddeleri eklenerek ısıya karşı direnci artırılır. Karbon veya doğal fiberlerle takviye edilen rPETG, çekme mukavemetini artırarak daha ağır yükler altında çalışabilen endüstriyel parçaların üretimine olanak tanımaktadır (Ergene ve ark., 2023).Ancak malzemenin de saydamlığını bozularak matlaşır ve akışkanlığı azalarak işlenebilirlik sürecini zorlaştırır (Jiang ve ark., 2021).

Plastik atıklar hep aynı ürünü yapmak için (örneğin filamentten tekrar filament üretmek için) geri dönüşüm yapıldığında %85-90'lara kadar yüksek bir verim elde edilir. Ancak farklı ürünlere çevrildiklerinde malzeme kalitesi düştüğü için bu verim %60-70 gibi olmaktadır. Bu nedenle, çevreci döngüsel ekonomi modellerinin işletiminde kritik bir parametre olarak dikkat edilmelidir (Ellen MacArthur Foundation, 2023).

## **4. MEKANİK ÖZELLİKLERİN DENEYSEL ve ANALİTİK DEĞERLENDİRİLMESİ**

rPETG filamentlerin mekanik özellikleri, ASTM/ISO standartlarına göre; çekme, eğilme, darbe ve katmanlar arası kayma testleriyle karşılaştırılır. Saf PETG- rPETG ile değerlendirilen veriler, geri dönüşüm derecesi, imalat koşulları ve içinde katkı kullanımı ve oranına göre değişkenlik gösterir.

Çekme Dayanımı ve Uzama: ASTM D638 standardına göre hazırlanan Tip I numunelerde, saf PETG'nin çekme dayanımı 48-52 MPa, kopma uzaması %80-120 aralığındadır. 1. döngü; (tek döngü); rPETG'de dayanım %5-8 oranında düşerken, uzama %15-20 oranında azalır. 3. döngü; rPETG'de dayanım 38-42 MPa'a, kopma uzaması %40-50'lere kadar geriler (Vidakis ve ark., 2022; Cruz Sanchez ve ark., 2020). Bu düşüşlerin sebebi, iç yapıyı oluşturan zincir kesilmesi ve moleküler ağırlık dağılımının daralmasıyla açıklanır. Eğer zincir uzatıcı katkı maddesi kullanılırsa rPETG'de ise dayanım 46-49 MPa, kopma uzaması %70-90 aralığına doğru tekrardan çıkmaktadır (Wang ve ark., 2023).



Eğilme Dayanımı ve Modülü: ASTM D790'a göre üç nokta eğilme testlerinde, saf PETG'nin eğilme dayanımı 75-80 MPa, elastisite modülü 1,8-2,1 GPa'dır. rPETG'de modül değişimi minimal (%3-5 düşüş) iken, dayanım %8-12 oranında azalmaktadır. Böylelikle geri dönüşümü yapılmış malzemenin tokluğunu korunduğunu ancak sünekliliğinin düştüğünü göstermektedir. Eİ eğilme performansı, imalatın basım yönüne (XY, XZ, ZX) bağlı olarak anizotropik (yöne bağlı olarak farklı özellikler gösterme) davranır. XZ yönünde dayanım, XY'ye göre %25-30 daha düşüktür (Katti ve ark.,2022).

Darbe Tokluğu: ASTM D256 (Izod) veya D6110 (Charpy) testlerinde, saf PETG'nin darbe dayanımı 650-850 J/m arasında değer alır. rPETG'de, yapılan döngü sayısına göre %15-35 oranında azalmaktadır. Döngü sürecinde katılan zincir uzatıcı veya %5 TPU karışımı, darbe tokluğunu %20-30 oranında artırarak saf haldeki değer seviyelerine yaklaştırır (Zander ve ark., 2021). Malzemenin darbe direnci, özellikle hareket eden veya titreşen parçalar için önemlidir.

Katmanlar Arası Adezyon ve Anizotropi: FDM'de mekanik özelliklerin en zayıf yönü, katmanlar arası bağlanmadır. rPETG daha akışkan olduğundan, daha iyi yapışma olacağı düşünülmektedir. Ancak tersi bir durum olarak, malzemenin içinde kalan nem kalıntısı veya bozulmuş ürünler, ara yüzeyde hava kabarcıkların sıkışmasına ve zayıf bağ oluşumuna yol açar. Elektron mikroskobu (SEM) görüntülerinde, rPETG numunelerinde saf PETG ye oranla katmanlar arası yüzeylerindeki boşluklar %10-15 daha fazladır (Vidakis ve ark., 2022). Bu durum dik yöndeki çekme dayanımı %30-40 arasında düşürmektedir. Bu durumda baskı ayarlarını optimize ederek (nozul sıcaklığını  $10^0$  artırıp, tabla sıcaklığını 70 derece ve baskı hızını 30-40 mm/s'ye düşürerek) katmanların birbirine geçişini ve yapışmasını güçlendirile bilinir (Cruz Sanchez ve ark., 2020).

Yorulma ve Sürünme: Bir malzemenin uzun vadeli dayanıklılığını anlamak için yorulma (ASTM E466) ve sürünme testleri kritik öneme sahiptir. rPETG'nin sürünme direnci, saf PETG'ye göre %10-15 daha düşük olsa da uygun baskı ayarlaması yapıp fark %5'in altına azaltılarak özellik takriben eşit seviye getirile bilinir (Wang ve ark., 2023). Bu sonuçlarla, rPETG'nin statik ve hafif dinamik yüklerde güvenilir olduğunu, fakat önem arz eden yapısal uygulamalarda tasarım emniyet katsayısının daha yüksek olmasının zorunluğunu göstermektedir.

**Tablo 1.** Saf PETG ve rPETG'nin mekanik özelliklerinin karşılaştırması (ortalama değerler), (Vidakis ve ark., 2022; Wang ve ark., 2023; Cruz Sanchez ve ark., 2020)

| Özellik               | Saf PETG | 1. Döngü rPETG | 3. Döngü rPETG | rPETG + Zincir Uzatıcı |
|-----------------------|----------|----------------|----------------|------------------------|
| Çekme Dayanımı (MPa)  | 50,2     | 46,8           | 40,1           | 48,5                   |
| Kopma Uzaması (%)     | 95       | 78             | 45             | 82                     |
| Eğilme Dayanımı (MPa) | 77,3     | 70,5           | 64,2           | 75,1                   |
| Darbe Tokluğu (J/m)   | 740      | 610            | 480            | 690                    |
| Z-Yönü/XY Oranı       | 0,68     | 0,61           | 0,54           | 0,65                   |

**Tablo 2.** PETG polimerinin ardışık mekanik geri dönüşüm süreçlerinin (N=0'dan N=3'e) malzeme özellikleri üzerindeki bozunma etkisini (Dohan ve ark., 2024)

| Geri Dönüşüm Oranı / Çevrimi | Ortalama Moleküler Ağırlık (Mw, g/mol) | MFI (g/10 dk @230°C, 2.16kg) | Camsı Geçiş Sıcaklığı (Tg, °C) | Termal Bozunma Sıcaklığı (Tmax, °C) |
|------------------------------|----------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| Orijinal PETG (N=0)          | 68,500 ± 1,200                         | 12.4 ± 0.3                   | 79.1 ± 0.2                     | 402.5                               |
| rPETG (1. Çevrim - N=1)      | 59,200 ± 1,500                         | 16.8 ± 0.5                   | 77.8 ± 0.4                     | 394.2                               |
| rPETG (2. Çevrim - N=2)      | 48,100 ± 1,900                         | 23.1 ± 0.8                   | 75.9 ± 0.5                     | 385.0                               |

| Geri Dönüşüm Oranı / Çevrimi | Ortalama Moleküler Ağırlık (Mw, g/mol) | MFI (g/10 dk @230°C, 2.16kg) | Camsı Geçiş Sıcaklığı (T <sub>g</sub> , °C) | Termal Bozunma Sıcaklığı (T <sub>max</sub> , °C) |
|------------------------------|----------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| rPETG (3. Çevrim - N=3)      | 37,400 ± 2,300                         | 32.7 ± 1.4                   | 73.2 ± 0.7                                  | 371.8                                            |

## 5. KATMANLI İMALATTA SÜREÇ PARAMETRELERİ VE PERFORMANS İLİŞKİSİ

rPETG'nin FDM teknolojisinde verimli bir şekilde kullanımı, malzemenin iç yapı özelliklerinin yanında imalat parametrelerinin de uygun olmasına bağlıdır. Saf PETG için uygun olan ayarlar, rPETG'nin ısı geçişi ve moleküler yapısı nedeniyle uygun olmayabilir yada aşırı ısıyla bozunmasına neden olabilmektedir (Dizon ve ark., 2021; Anderson ve ark., 2020). rPETG için sıcaklık, hız ve diğer parametreleri doğru kalibre edildiğinde, ürünün mekanik performansında belirleyen önemli unsurlar olduğunu göstermektedir (García-Plaza ve ark., 2023).

Nozul ve Yatak Sıcaklığı: rPETG baskı kalitesinde en verimli işleme için sıcaklık dengesi büyük önem arz etmektedir. Nozul sıcaklığının 225-235°C aralığında olması filament malzemesinin daha düzgün erimesini sağlarken, 215°C altı düşük sıcaklıklarda tam ergime olmayacağı için akış sorunlarına yol açar. İdeal olarak, tabla sıcaklığı 65-75°C aralığında tutulmalı; 80°C'yi aşan değerlerde baskı yapılan ürünün malzemesinin yumuşamasına ve parçanın bozulmasına neden olur. Sonuç olarak iyi ve kaliteli bir baskı kalitesi için önemli olan iki sıcaklık değerinin de maksimum ya da minimum olan bu ideal aralıklar arasında olması gerekir (Katti ve ark., 2022).

Baskı Hızı ve Katman Kalınlığı: rPETG ile kaliteli ve dayanıklı baskı yapılabilmesi için baskı hızının ve katman kalınlığının doğru ayarlanmalıdır. 3 boyutlu baskı yapılırken 60 mm/sn üzerindeki yüksek hızlarda ergiyen plastiğin, alttaki katmana tam kaynaşmayacağından katmanlar arası zayıf olur. Bu durumda 30-45 mm/sn arasındaki hızlar ideal olmaktadır. Katman kalınlığı olarak 0,15-0,2 mm aralığında ince yapıda kullanmak ara yüzey bağlantılarını artıracığı için boyuna(dikine) dayanaklığı güçlendirir, 0,3 mm üzerindeki kalın katmanlar ise hava boşluklarını %8-12 artırır ve dolayısıyla yapısal zayıflığa neden olur (Cruz Sanchez ve ark., 2020).

Dolgu Oranı ve Deseni: rPETG ile yapılan baskılarda, % 40-60 doluluk oranı çoğu yapısal uygulama için hem yeterli dayanımı hem de ekonomik verimliliği sağlar. %100 doluluk oranı, maksimum dayanım sağlar ancak malzeme tüketimini artıracığı için ekonomik değildir. Dolgu deseni seçiminde ise çizgisel modellerin yön bağımlı zayıflıklarından kaçınmak gerekir. Bunun yerine bal

peteği (honeycomb) veya gyroid desenleri tercih edilmelidir. Bu geometriler, geri dönüştürülmüş malzemenin darbeleri emme kapasitesini artırarak parçanın her yönde dengeli ve yüksek direnç göstermesini sağlar (Wang ve ark., 2023).

**Soğutma Fanı:** PETG, PLA'dan farklı olarak yüksek soğutma hızlarında katman yapışma özelliğini kaybeder. rPETG baskı işlemlerinde ideal fan hızının %20-40 arasında olması, malzemenin esnekliğinin korunması için hayati önem taşır. Fan hızının %50'den fazla olmasında ise katmanlar arasındaki kristalleşmeyi hızlandırarak parçanın daha kırılgan olmasına sebep olur (Vidakis ve ark., 2022).

**Nem Kontrolü ve Depolama:** rPETG, üretim sonrası bile nem absorbe eder. Filament kuru kutuda (<%20 RH-bağıl nem oranı) saklanmalı, baskı öncesi 65°C'de 2 saat kurutulmalıdır. Nemli filament, baskı sırasında, gözenek ve yüzey pürüzlülüğüne (popping) yol açar. Bu durum, çekme dayanımını %15-20 düşürür (Zander ve ark., 2021).

rPETG, üretimden sonra dahi havadaki nemi hızla içine çeken bir yapıya sahiptir. Bundan dolayı filament kuru ortamda (kutularda) saklamak ve kullanmadan hemen öncesinde 2 saat boyunca 65° fırında kurutmak gereklidir. Nemli filament kullanmak, erime esnasında çıtlama sesleri, gözenekli yüzey ve zayıf katmanlarla %15-20'ye varan dayanım kaybına yol açarak malzemenin yapısal bütünlüğünü zayıflatır.

**Proses Optimizasyonu:** Uygun ve kusursuz bir baskı kalitesi için Taguchi gibi bilimsel istatistiksel yöntemler kullanmak gereklidir. Yapılan çalışmalarda, nozul sıcaklığı, baskı hızı ve dolgu oranının birbirleriyle bağlantılı olarak etkileşiminde, ürünün mekanik dayanıklılığının %60'ını belirlediğini göstermektedir. Ürün kalitesi için bu üç parametrenin ayrı ayrı değil, birbirini dengeleyecek şekilde senkronize olarak ayarlanması kritiktir; aksi takdirde optimize edilmemiş tek bir ayar tüm baskı performansını olumsuz etkileyecektir (Katti ve ark., 2022). Bundan dolayı, rPETG baskı işlemlerinde malzeme özellikleri ile proses parametrelerinin uyumlu hale getirilmesi şarttır.

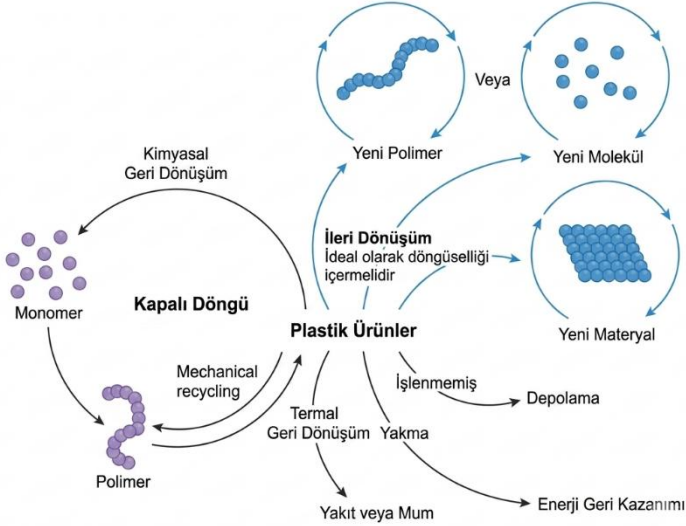
## **6. DÖNGÜSEL EKONOMİ MODELİ VE YAŞAM DÖNGÜSÜ ANALİZİ**

Döngüsel ekonomi modeli, atığı yok ederek kaynak verimliliğini esas alan "üret-kullan-dönüştür" odaklı bir yaklaşımdır (Ellen MacArthur Foundation, 2023). Ekllemeli imalat bu model üç ana ilke üzerine kuruludur:

- **Kapalı Döngü:** Atık plastiklerin filament haline getirilerek sürekli üretim sürecine geri kazandırılmasıdır.
- **Geri Dönüşüm Odaklı Tasarım:** Parçaların en baştan kolayca eritilip yeniden kullanılabilmesi için tek tip malzemeden, birleştirici kimyasallar veya metal parçalar olmadan tasarlanmasıdır.

- **Dijital İzlenebilirlik:** Her parçaya bir "malzeme pasaportu" oluşturularak; içeriğinin, geri dönüşüm geçmişinin ve özelliklerinin dijital ortamda kaydedilmesi ve takip edilmesidir.

Bu döngüsellik sistemi, plastiği bir atık madde olarak değil, bu sistem içerisinde sürekli katma değer oluşturan bir kaynak haline getirmektedir.



**Şekil 6.** Polimer atıkların kapalı döngü geri dönüşümü ve farklı kimyasal bileşenlere ileri dönüşüme (upcycling) genel bakış, (Basterretxea, 2022)

Yaşam Döngüsü Analizi (LCA): ISO 14040/44 standartları çerçevesinde yürütülen araştırmaların yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) analizlerinde, çevre sorunu önemli ölçüde hafiflettiğini raporlanmaktadır. rPETG üretiminin saf PETG ile kıyaslandığında sera gazı salınımını %45-60, petrol tüketimini %50-65 ve su kullanımını %40-55 (su ayak izi) azalttığını göstermektedir (European Commission, 2023; Plastics Europe, 2023). Diğer yandan geri dönüşüm için harcanan enerji, taşıma masrafları ve plastiğin kalitesindeki düşüş hesaba katıldığında, net gerçek kazanım %30-40 civarında olur. Plastik 3-4 kez geri dönüşüm yapıldıktan sonra iç yapısı iyice bozulacağı için, artık değerini kaybettiğinden dolayı (LCA etkisi) kimyasal yollarla ayrıştırılmalı ya da yakılarak enerji elde edilmesinde kullanılmalıdır (Hopewell ve ark., 2021).

Kapalı Döngü Tedarik Zinciri: rPETG'yi endüstri gibi büyük düzeyde kullanabilmek için toplama merkezlerinden işleme tesislerine ve kullanıcılara kadar tüm zincirleme bir şekilde organize çalışması gerektirir. Küçük ölçekli işletmelerde ve üniversite, AR-GE gibi araştırma kurumlarında 3 boyutlu yazıcıdan çıkan atık granül, yeni filament-yeniden yazıcı, filament üreten kapalı döngü modeli, başarılı sonuçlar vermiştir (Cruz Sanchez ve ark.,2020). Endüstriyel ölçekte rPETG kullanımı, standartlaşma ve ekonomik fizibilite

maliyet engelleri yüzünden zorlu bir süreçtir. Bu süreçte kalite kontrolü sağlamak için her filamentin geri dönüşüm geçmişi, akışkanlık değerleri ve nem verileriyle dijital olarak tanımlanması (dijital kimlik kartı), kalite güvenilirliği için gerekliliktir (ISO/ASTM 52900, 2021).

**Genişletilmiş Üretici Sorumluluğu (EPR) ve Politika:** Avrupa Birliği'nin 2023 plastik stratejisi ve tek kullanımlık plastiklere yönelik kısıtlamaları, endüstriyi geri dönüştürülmüş ürünlerinde belirli oranda geri dönüştürülmüş plastik kullanmaya zorunlu kılmaktadır. 2030 yılına kadar filament içeriklerinde rPETG oranının yaklaşık %30'a ulaşması hedefi, firmaları hammadde temin yöntemlerinde küresel tedarik zincirlerinin tamamen değiştirmeye yöneltmektedir. Ancak devlet tarafından vergi indirimleri, araştırma destekleri ve uluslararası kalite belgeleri gibi teşvikler sağlanmaması ve yapısal unsurlar eksik kaldığı takdirde, sektörün bu çevreci düzene geçişi oldukça yavaş ve sancılı olacaktır (European Commission, 2023).

**Ekonomik Fizibilite:** Geri dönüştürülmüş PETG filament, saf PETG'den %15-25 daha ucuzdur. Ancak bu süreçteki kalitesini kontrol denetimleri, iç yapısına gerekli katkı maddeleri eklemek ve üretim ayarlarını optimize etmek ekstra maliyeti arttırır. Net kar marjı, fabrika üretiminin büyüklüğüne ve geri dönüşüm süreçlerinin verimliliğine göre belirlenir. İşletmeler yatırım yaparken sadece fiyata endeksine değil, çevresel ve ekonomik tüm maliyetlere bakmalıdır (Wang ve ark.,2023).

## **7. TEKNİK, EKONOMİK VE REGÜLASYONEL ZORLUKLAR**

rPETG'nin FDM teknolojisinde yaygınlaşmasında bazı zorluklarla sınırlanmaktadır. Teknik sınırlar, pazar dinamikleri ve regülasyon boşlukları bunlardan bir kaçısı olarak sınıflandırılabilir.

### **7.1. Teknik Zorluklar**

**Degradasyon ve Çoklu Döngü Limiti:** Geri dönüşümde her ısıl işlem, içyapıdaki zincir bağlarını zayıflatır. 4. döngü sonrasında mekanik performans özellikleri %30'dan da aşağıya düşer. Kimyasal geri dönüşüm (glikoliz, hidroliz) teknik olarak mümkündür, fakat pahalı ve hesaplanmamıştır (Zander ve ark., 2021).

**Nem Hassasiyeti ve Depolama:** rPETG, saf PETG filamente göre daha hızlı bir şekilde nemi bünyesine alır. Depolama alanlarında ve kutulamada altyapısı eksikliği, kalitesizliğe yol açar.

**Anizotropi ve Tasarım Kısıtları:** Baskı işleminde Z yönü zayıf olmakta, bu durum yapısal uygulamalarda tasarımın güçlenmesini gerektirir. Topoloji optimizasyonu ve yönler göre baskı stratejileri henüz tam net değildir (Katti ve ark.,2022).

Katı Atık Karışımı: PLA/PETG/ABS karışımları, ayıklama maliyetini artırır. Bu ayıklama sistemini yapacak olan NIR sistemleri KOBİ'ler için çok fazla pahalıdır.

## 7.2. Ekonomik ve Pazar Zorlukları

Ölçek Ekonomisi Eksikliği: rPETG henüz sınırlı bir pazar çevresine hitap ederken, üreticileri devamlılıklarını saf ham madde temelli tedarik zincirleri üzerinden sağlamaya devam etmektedir.

Fiyat-Kalite Algısı: Sertifikasyon ve tam bir uygulama parametresi olmadığından dolayı kullanıcılar, rPETG'yi düşük kaliteli ürün olarak algılar.

Yatırım Riski: Geri dönüşüm tesisi kurulumu (öğütücü, ekstrüder, kurutucu, test ekipmanı) 150.000-300.000 EUR aralığındadır. Bunun yatırım getirisi, 3-5 yıl aralığında sürer (Wang ve ark., 2023).

## 7.3. Regülasyon ve Standartlaşma

Test Standartları Eksikliği: ISO/ASTM 52900 genel bir bilgi altyapısı sağlasa da, rPETG özelinde malzeme kalitesini ve çevresel standartları tanımlayan herhangi bir uluslararası referans standardı eksikliği devam etmektedir.

Geri Dönüştürülmüş İçerik Doğrulaması: Ambalajlarda yazan %30 rPETG geri dönüştürülmüş içerik beyanları, tarafsız laboratuvar testleri olmadan şüphelidir ve "greenwashing" (yeşil aklama) riski doğurmaktadır. Çünkü kütle dengesi yaklaşımı ve izotopik doğrulama teknikleri henüz standart bir uygulama haline gelmemiştir (European Commission, 2023).

Sorumluluk ve Garanti: rPETG ile baskısı yapılan parçaların sorununda, üretici firma, filament tedarikçisi veya baskıyı yapan kişinin sorumluluğu belirsizdir. Bu konuda yasal sözleşme çerçevesi eksiktir.

Bu karmaşık dönüşüm süreci; paydaşlar arası stratejik iş birlikleri, şeffaf veri paylaşım platformları ve etkin kamu-özel sektör ortaklıkları ile yönetilebilir. Özellikle pilot uygulamalar, uluslararası standartların oluşturulması ve hedefe yönelik eğitim programları, rPETG ekosisteminin olgunlaşmasını sağlayan kritik hızlandırıcı mekanizmalardır.

## 8. SONUÇ VE ÖNERİLER

rPETG filamentler, eklemeli imalatın üretim süreçlerinin çevresel etkilerini hafifletmek ve kaynak döngüselliğini sağlamada, saf PETG'de teknik parametreleri ile elverişli bir çözüm sunmaktadır. Yapılan araştırmalar ve deneysel veriler, uygun proses kontrolü, nem kontrolü ve zincir uzatıcı katkılarla rPETG'nin mekanik özellik performansının saf PETG'ye %85-95 oranında yaklaştırılabileceğini belirtmektedir. Geri dönüşümün artmasına paralel olarak bozulmalar, anizotropi, nem hassasiyeti ve standartlardaki proses eksiklikleri, standartlaşmada temel engel olarak görülmektedir. Küresel pazarda döngüsel

ekonomi olarak rPETG, sadece bir malzeme değişimi değil, endüstriyel değişimi yenileyen araçtır. LCA verileri, bu sektörde %40-60 aralığında çevresel kazanç olduğunu belirtirken bu durumun ekonomik fizibiliteye, malzemenin çokluğuna ve ne kadar verimli olduğuna bağlıdır. Kamu sektörü, imalatçılar ve son olarak da kullanan kişiler arasındaki iletişim kapalı döngü tedarik zincirlerinin yapılabilmesi açısından zorunluluk ifade eder.

Literatürdeki bilgilere göre; rPETG için nozul sıcaklığı 225-235°C, baskı hızı 30-45 mm/s, fan %20-40, yatak ısısı 70°C olmalıdır. Nem kontrolü ve kurutma protokolü belli bir standartta oturtulmalıdır. %0,5-1,5 epoksi fonksiyonlu katkı, çoklu döngü performansını korur. Bunun için maliyet-fayda analizi yapılmalıdır. Geri dönüşümde, dijital filament pasaportu (Batch no, döngü sayısı, MFI, nem, test verileri blockchain veya QR kod) ile izlenmelidir. ISO/ASTM standartlarında, rPETG'ye özel mekanik, termal ve LCA standartları prosesleri hazırlanmalıdır. EPR (Genişletilmiş Üretici Sorumluluğu) çerçevesinde geri dönüştürülmüş madde zorunluluğu, vergi indirimi ve Ar-Ge destekleri pazarı evrildir. Kullanıcı kılavuzları, atık ayıklama protokolleri ve DfR (Geri Dönüşüm için Tasarım) prensipleri müfredata ve endüstriyel eğitime entegre edilmelidir. Gelecek araştırmalar, kimyasal geri dönüşüm entegrasyonu, yapay zeka tabanlı proses kontrolü, çoklu malzeme karışımları ve gerçek zamanlı degradasyon izleme sistemlerine odaklanmalıdır. rPETG, Eİ sürdürülebilir dönüşümünde kritik bir köprü malzemesidir. Teknik olgunluk, ekonomik fizibilite ve politika desteği birleştiğinde, döngüsel ekonomi vizyonu gerçeğine dönüşebilecektir.

Bu sınırlamaları aşmak ve rPETG parçaları endüstriyel üretime kazandırmak için makine ve imalat mühendisliğinde iki ana temelli çözüm maddesi öne çıkmaktadır:

- **Malzeme Harmanlama (Blending):** Atık PETG malzemelerin %100 oranında kullanılması yerine, belirli oranlarda (örn. %70 orijinal + %30 geri dönüştürülmüş veya %50-%50) orijinal ham madde ile harmanlanarak ekstrüde edilmesi. Bu yöntem, moleküler ağırlık dağılımını dengede tutarak mekanik kayıpları kabul edilebilir düzeyde (%5'in altında) tutmaktadır.
- **Yeşil Kompozit Geliştirme (Green Composites):** Geri dönüşümle kaybedilen mukavemet ve rijitliği telafi etmek amacıyla, rPETG matris içerisine kısa karbon fiber, cam fiber veya selüloz bazlı doğal liflerin takviye edilmesidir. Takviye elemanları, yükü polimer zincirlerinden devralarak parçanın mekanik performansını orijinal PETG'nin bile üzerine çıkarabilmektedir.



## Kaynaklar

1. Anderson, I., Hart, R., & Walker, M. (2020). Sustainability and mechanical performance of recycled polymers in additive manufacturing. *Journal of Additive Manufacturing Technology*, 12(3), 245-258.
2. Babagowda, A., Kumar, A., & Pavan, H. (2023). Influence of process parameters on mechanical properties of 3D printed PETG using fused deposition modeling. *Materials Today: Proceedings*, 80, 2768-2774.
3. Basterretxea A., (2022). Want to know more about plastic upcycling? Polykey.. <https://polykey.eu/want-to-know-more-about-plastic-upcycling-2/>.
4. Carrasco, F., Pagès, P., Pascual, S., & Colom, X. (2001). Transformation and thermal degradation of poly(lactic acid) during its processing. *Polymer Degradation and Stability*, 72(1), 163-172.
5. Cruz Sanchez, F., Boudaoud, H., Camargo, M., & Pearce, J. M. (2020). Plastic recycling in additive manufacturing: A systematic literature review and opportunities for the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121602.
6. Cruz, J., & Santana, J. (2022). Mechanical performance of 3D printed specimens using recycled PETG/rPET blends. *Journal of Manufacturing Processes*, 81, 1022-1035.
7. Despeisse, F., Baumer, M., Brown, P., Scott, I., & Tavakoli, S. (2017). Unlocking value for a circular economy through 3D printing: A research agenda. *Journal of Industrial Ecology*, 21(1), 109-121.
8. Dizon, J. R. C., Valderrama, E. C., Santos, T. P., & Pring, N. V. (2021). The mechanical and thermal properties of 3D printed PETG using recycled material. *Journal of Manufacturing Processes*, 64, 456-465.
9. Dohan, V., Galatanu, S.-V., & Marsavina, L. (2024). Mechanical evaluation of recycled PETG filament for 3D printing. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 70, 310–321. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.70.18>
10. Dorigato, A. (2021). Recycling of polymers: a review. *Progress in Materials Science*, 118, 100762.
11. Ellen MacArthur Foundation. (2023). The Global Commitment 2023 Progress Report. Ellen MacArthur Foundation.
12. Ergene, B., Ispartalı, H., Karakılınç, U., (2023). Impact behavior of PET-G parts produced by fused deposition modelling depending on layer height and test temperature. *\*Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University\**, 38, 1345–1359.

13. European Commission. (2023). Circular Economy Action Plan: Monitoring framework for the circular economy. Publications Office of the European Union.
14. Exconde, R. J., Rallos, M. C., & Dizon, J. R. (2019). Mechanical properties of 3D printed polylactic acid (PLA) using fused deposition modeling. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 13(10), 577-581.
15. García-Plaza, E., Núñez, P. J., & Sánchez, M. (2023). Mechanical and thermal characterization of 3D-printed recycled PETG: The influence of print orientation and infill density. *Journal of Applied Polymer Science*, 140(12), e53654.
16. Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757-768.
17. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2021). *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing* (3rd ed.). Springer.
18. H. Wang, Y. Zhang, C., (2019). Wang, Surface modification and selective flotation of waste plastics for effective recycling - a review, *Sep. Purif. Technol.* 226 75-94.
19. Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2021). Plastics recycling: Challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 374(1778), 20180255.
20. ISO 20753 (2018). *Plastics – Test specimens*. International Organization for Standardization.
21. ISO/ASTM 52900 (2021). *Additive manufacturing – General principles – Fundamentals and vocabulary*. International Organization for Standardization / ASTM International.
22. Jiang, J., Ma, X., Stringer, J., Wang, Y., & Xu, X. (2021). A review for research spend on additive manufacturing: Sustainability, design, and manufacturing. *Additive Manufacturing*, 44, 102047.
23. Katti, A., Ganganagappa, N., & Varghese, S. (2022). Sustainable 3D printing: A review of recent advancements in recycled polymer-based additive manufacturing. *Journal of Polymers and the Environment*, 30(9), 3567-3588.
24. Latko-Durałek, P., Kubiczek, J., & Kaczmar, P. (2019). The effect of material and process parameters on the mechanical properties of 3D printed parts. *Polymers*, 11(11), 1845.

25. Latko-Durałek, P., Dydek, K., Boczkowska, A., (2019). Thermal, Rheological and Mechanical Properties of PETG/rPETG Blends., *Journal of Polymers and the Environment*, 27(1), 2600-2606
26. *Plastics Europe*. (2023). *Plastics – the fast facts 2023: An analysis of the European plastics production, demand and waste data*. *Plastics Europe*.
27. Sezer, H. K., Eren, O., Börklü, H. R., & Özdemir, V. (2018). Karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin ergiyik biriktirme yöntemi ile eklemeli imalatı: Fiber oranı ve yazdırma parametrelerinin mekanik özelliklere etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(4), 1361-1372. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416523>
28. Shanmugam, V., Das, O., Marimuthu, U., Chandrasekaran, S., & Neisiany, R. E. (2023). Mechanical and thermal properties of recycled PETG filaments for additive manufacturing: A review. *Journal of Applied Polymer Science*, 140(12), e53685.
29. Szykiedans, M., & Credo, W. (2016). The mechanical properties of specimens printed with the use of the FDM technology. *MATEC Web of Conferences*, 73, 05007.
30. Vidakis, N., Petousis, M., Velidakis, E., Tzounis, L., Mountakis, N., & Kechagias, J. D. (2022). Mechanical performance of 3D printed PETG: The impact of recycled filament. *Materials*, 15(19), 6758.
31. Wang, Z., Huang, Y., & Chen, X. (2023). Mechanical performance and microstructure analysis of recycled PETG 3D printed parts. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 3812-3825.
32. Zander, N. E., Gillan, M., & Dolan, J. (2021). The effect of recycled PETG on the mechanical and thermal properties of 3D printed parts. *Additive Manufacturing*, 37, 101648.



## *BÖLÜM 8*

# Bir Biyomalzeme Olarak Bakteriyel Selüloz

*Doğuhan Yalım<sup>1</sup> & İlyas Kartal<sup>2</sup>*

## 1. Giriş

Enerji yetersizliği ve çevre kirliliği, günümüz dünyasının en kritik sorunlarının başında gelmektedir. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak sentezlenebilen, doğada bol bulunan, düşük maliyetli ve biyobozunur polimerlerin geliştirilmesi; malzeme biliminin en güncel araştırma alanlarından biri haline gelmiştir (Klemm vd., 2011).

Yeryüzünde en bol bulunan biyopolimer olan selüloz, bitki hücre duvarlarının temel yapısal bileşeni olmasının yanı sıra bazı bakteri ve arke türleri tarafından da sentezlenen bir makromoleküldür (Vieira, Silva-Correia, Reis, & Oliveira, 2022). Bakteriler tarafından sentezlendiğinde “bakteriyel selüloz” (BS) olarak adlandırılan selüloz; lignin, hemiselüloz ve pektin içermeyen, son derece yüksek oranda su tutabilen saf bir biyofilm formunda bulunmaktadır. Başta *Komagataeibacter* olmak üzere *Acetobacter*, *Agrobacterium*, *Pseudomonas* ve *Sarcina* gibi çeşitli bakteri türleri BS sentezleyebilmektedirler (Cannon & Anderson, 1991). Kimyasal saflığı ve çok yönlü yüzey modifikasyonlarına elverişli olan moleküler yapısıyla BS; hem sürdürülebilir endüstriyel teknolojilerde hem de yara örtüleri, ilaç salım sistemleri ve doku mühendisliği gibi biyomedikal uygulamalarda son derece önemli bir hammadde olarak ön plana çıkarmaktadır.

## 2. Selüloz Sentezleyen Bakteriler ve Bakteriyel Selülozun Sentezi

BS sentezinin çeşitli bakteriler tarafından gerçekleştirildiği bilinmektedir. Bu kapsamda tanımlanan bakteri suşları arasında *Acetobacter*, *Azotobacter*, *Rhizobium*, *Pseudomonas*, *Salmonella*, *Agrobacterium*, *Aerobacter*, *Achromobacter* ve *Alcaligenes* gibi çoğunlukla Gram-negatif özellik gösteren türler bulunmaktadır. Bunun yanı sıra *Sarcina ventriculi*, *Salmonella* ve *Escherichia* gibi Gram-pozitif türler de selüloz üretme kapasitesine sahiptir (Shoda & Sugano, 2005).

<sup>1</sup> MSc., Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Marmara Üniversitesi, Türkiye, ORCID: 0000-0002-3549-0287

<sup>2</sup> Doç. Dr., Kurum Bilgisi: Kurum Bilgisi: Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Marmara Üniversitesi, Türkiye, ORCID: 0000-0001-9677-477X

*A. xylinum*, hem kalite hem de miktar bakımından daha yüksek oranda BS üreten başlıca suş olup kültür ortamı için gerekli olan besiyeri bileşenlerinin kolayca temin edilebilmesi onu BS sentezi için en verimli seçenek kılmaktadır. Gram-negatif ve aerobik bir suş olan *A. xylinum*, çubuksu yapıda olup birincil metabolik aktivitesi sonucunda birbirine geçmiş şeritler formunda selüloz üretmektedir. *A. xylinum*'un bir diğer avantajı da çeşitli karbon kaynaklarını kullanarak çok yönlü selüloz üretim yeteneğine sahip olmasıdır. *A. xylinum*'da selüloz sentezi, temel olarak bir yapısal koruma mekanizması olarak gerçekleşmekte; yüzeyde gelişen selüloz pelikülü, bakterileri UV ışığının öldürücü etkisinden korumaktadır. Ayrıca pek çok araştırmacı, artan oksijen arzının *A. xylinum* ile gerçekleştirilen selüloz sentezini olumlu yönde etkilediğini gözlemlemiştir. Selüloz, bu bakterilerde dış hücre duvarı ve sitoplazma membranında, selüloz sentaz adı verilen enzim aracılığıyla sentezlenmektedir (Sözcü vd., 2026).

BS sentezi, statik veya çalkalamalı koşullar altında gerçekleşebilmektedir. Statik kültürde bakteriler fermantasyon gerçekleşene kadar besiyeri ile birlikte hava alan ve karanlık bir yerde bırakılmaktadır. Çalkalamalı kültürde ise düzenek, işlem süresi boyunca sürekli olarak karıştırılmaktadır. Selüloz üretimi, hücre konsantrasyonunun artışı ile doğru orantılı bir korelasyon göstermektedir (Sozcu vd., 2025; Ye vd., 2019).

Statik kültür tekniğinde besiyeri, bakteri suşunun gereksinimlerine göre hazırlanmaktadır. Bakteri ekiminin ardından besiyeri, sabit koşullarda tutulmaktadır. Verimi artırmak amacıyla yeterli oksijen arzı sağlayacak şekilde havalandırılan bir ortamda inkübasyon gerçekleştirilmektedir. Ayrıca bazı araştırmacılar, karanlık ortamın *A. xylinum* türünden selüloz üretimini artırdığını da bildirmişlerdir. Statik kültür yöntemi en yaygın kullanılan tekniklerden biri olsa da bu üretim yönteminin temel dezavantajı fermantasyon süresinin uzun olmasıdır. Bir diğer dezavantajı ise fermantasyon süresi boyunca farklı konumlarda bulunan bakteriler için besin ve oksijen arzının yetersiz kalabilmesidir. Bu durum, farklı bölgelerde bakteriyel selüloz üretiminde farklılıklara yol açarak, yer yer farklı kalınlıklara sahip, homojen olmayan bir selüloz matı oluşmasına neden olmaktadır (Loh, Arnardottir, Gilmour, Zhang, & Dade-Robertson, 2025; Sharma, Bhardwaj, & Pathak, 2021).

Çalkalamalı kültür yönteminde ise sistem, inkübasyon süreci boyunca döner bir çalkalayıcıda sürekli hareket halinde tutulmaktadır. Bu sayede sıvı besiyerindeki oksijen arzı artırılmakta; ancak selüloz küresel (topak) formda üretilmektedir. Daha önce belirtildiği üzere, kullanılan besiyeri türünden bağımsız olarak selüloz üretimi; ortamdaki basınç ve oksijen miktarının bir fonksiyonu olarak gerçekleşmektedir (Hsieh, Yano, Nogi, & Eichhorn, 2008).

Hestrin ve Schramm, statik koşullarda nispeten daha yüksek miktarda selüloz üretilbildiğini tespit etmiş olmakla birlikte, çalkalamalı kültürün gelişmiş oksijen arzı sayesinde selülozu statik kültüre göre daha hızlı ürettiğini de ortaya koymuşlardır (Son vd., 2003).

Güncel araştırmalar değerlendirildiğinde, çalkalamalı kültür yönteminin seri üretim açısından en yüksek potansiyele sahip olduğu savunulmaktadır (Guhados, Wan, & Hutter, 2005). Buna karşın tabaka formunda selüloz üretimi söz konusu olduğunda statik yöntem, çalkalamalı yöntemle kıyasla daha uygun bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Tabaka formu, geniş uygulama yelpazesi nedeniyle öncelikli tercih edilen selüloz morfolojisi olmaya devam etmektedir (Mohite & Patil, 2014).

Sonuç olarak, statik ve çalkalamalı kültür yöntemlerinin her birinin kendine özgü avantaj ve sınırlılıkları bulunmaktadır. BS'nin üstün mekanik dayanımı, yüksek nem tutma kapasitesi ve gelişmiş yapısal özellikleri, bu materyali bitkisel selüloza kıyasla daha geniş bir uygulama potansiyeline taşısa da üretim yönteminin seçimi, hedeflenen ürün formu ve uygulama alanına göre belirlenmelidir. Tabaka formunda üretim gerektiren biyomedikal uygulamalar için statik kültür ön plana çıkarken, daha yüksek verim ve hız gerektiren endüstriyel süreçler için çalkalamalı kültür daha elverişli bir seçenek sunmaktadır. Bununla birlikte, BS'nin bitkisel selülozun yerini tamamen alamayacağı da göz önünde bulundurulmalıdır. Bu alandaki temel güçlük, her iki yöntemin de endüstriyel ölçekli ve seri üretime taşınmasındaki fizibilite sınırlılıklarından kaynaklanmakta olup bu durum, yeni biyoreaktör tasarımları ve hibrit üretim stratejilerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

### **3. Bakteriyel Selüloz Sentezinde Besiyeri**

Besiyeri bileşimi, BS üretiminin kalitesi ve miktarı üzerinde doğrudan belirleyici bir rol oynamaktadır. Ayrıca BS üretim maliyetinin yaklaşık %30'unun besiyeri bileşenlerinden kaynaklandığı bilinmekte; bu durum, endüstriyel ölçekte ticari ve seri üretimi kısıtlayan önemli bir etken olarak öne çıkmaktadır.

BS üretiminde standart besiyeri olarak Hestrin-Schramm (HS) ortamı kullanılmakla birlikte, bu besiyeri çeşitli sentetik kimyasal bileşenler içermektedir. Karbon kaynağı, selüloz sentezi için temel bileşenlerden biri olup hücre metabolizması ve büyümesi için bir veya birden fazla karbon kaynağının kullanılması zorunludur. BS üretiminde en yaygın kullanılan karbon kaynakları sükroz, glikoz ve fruktoz olup gereksinim duyulan karbon kaynağı türü bakteri suşuna göre farklılık göstermektedir. Benzer şekilde, her suşun fermantasyon sürecindeki BS verimi de değişkenlik göstermektedir. *A. xylinum* ile gerçekleştirilen üretimlerde tercih edilen karbon kaynağı glikoz olmakla birlikte,

Schramm ve Hestrin'in öncül çalışmaları bu suşta glikoz kullanımına dayalı selüloz sentezinin oksijen arzıyla doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır (Embuscado, Marks, & BeMiller, 1994).

Glikozun karbon kaynağı olarak kullanılmasının temel dezavantajı, bir yan ürün olarak glukonik asit oluşturmaktır. Bu asidin birikimi besiyerinin pH değerini düşürerek selüloz verimini olumsuz etkilemektedir. HS besiyeri ve diğer şeker bazlı ortamların ikinci önemli dezavantajı ise yüksek bileşen maliyetidir (Hwang, Yang, Hwang, Pyun, & Kim, 1999).

pH, BS üretimi üzerinde doğrudan etkisi olan önemli parametrelerden bir diğeridir. Fermantasyon sürecinde glikozun glukonik aside dönüşmesi kültür ortamının pH'ını düşürmekte olup Masaoka ve arkadaşları, *A. xylinum*'dan optimum selüloz üretimi için pH'ın 4-6 aralığında tutulması gerektiğini rapor etmektedir (Masaoka, Ohe, & Sakota, 1993).

*Acetobacter* türlerinin büyümesi için optimum pH aralığı 5,4–6,3 olarak belirlenmiş olmakla birlikte, maksimum selüloz üretimi için optimum pH'ın 4,5–5,5 aralığında olduğu bildirilmektedir. Düşük pH koşullarında selüloz büyümesi önemli ölçüde azalmakta; pH değerinin 3,5'in altına düşmesiyle birlikte üretim tamamen durmaktadır (Embuscado vd., 1994).

Sonuç olarak, besiyeri bileşimi ve pH değeri, BS üretiminin verimliliğini doğrudan belirleyen iki kritik parametre olarak öne çıkmaktadır. Standart HS besiyerinin yüksek maliyeti ve glikoz kaynaklı glukonik asit birikiminin yarattığı pH düşüşü, hem üretim verimini hem de endüstriyel ölçeğe taşınabilirliği kısıtlamaktadır. Bu sınırlılıkların aşılmasına yönelik olarak tarımsal ve gıda endüstrisi atıklarının alternatif karbon kaynağı olarak kullanımı umut verici sonuçlar ortaya koymakta; pH kontrolü ile birlikte optimize edilmiş üretim koşullarının BS verimini önemli ölçüde artırabileceği görülmektedir.

#### **4. Bakteriyel Selülozun Kimyasal Yapısı ve Morfolojisi**

Bitkisel selüloz, tüm selüloz yapılarının temelini oluşturmaktadır.  $\beta$ -1,4 glikozidik bağlarla birbirine bağlanan D-glukopiranoz birimlerinden meydana gelen bu lineer polimer, yüksek polimerizasyon derecesi sayesinde üstün mekanik özellikler sergilemektedir. Yapısının %65'inden fazlası saf kristal formda bulunmakta olup bu bölgeler herhangi bir çözücü tarafından erişilememektedir (İqbal, Kyazze, Locke, Tron, & Keshavarz, 2015). Kimyasal yapı açısından hem bitkisel hem de bakteriyel selüloz aynı moleküler formüle sahiptir ancak fiziksel özellikleri büyük ölçüde farklılık göstermektedir. BS, daha yüksek kristalinite yüzdesine sahip oldukça saf bir selüloz formudur. Bakteriyel selülozun bireysel lif çapı, bitkisel selüloz lifinden yüz kat daha küçüktür. Bu



fiziksel yapı farkı, BS'nin çekme dayanımını ve nemle ilgili özelliklerini önemli ölçüde artırmaktadır.

BS yapısı da bitkisel selülozda olduğu gibi glikoz monomerlerinden oluşan lineer bir homopolimerden meydana gelmekte ve glikozidik bağlarla bir arada tutulmaktadır. Bununla birlikte BS'nin polimerizasyon derecesi 2000 ile 6000 arasında değişmekte olup bu değer bitkisel selüloza kıyasla belirgin biçimde daha düşüktür (Jonas & Farah, 1998a).

BS, selülozun en saf formlarından biri olup temel kimyasal yapısı, 180° rotasyonla bağlanan ardışık glikoz birimlerinden oluşmaktadır. Üretilen selülozun kalınlığı ve kalitesi, temel olarak bakteri türüne ve üretimde kullanılan besiyerine bağlıdır. Bununla birlikte, yapı içerisinde birçok selüloz zinciri hidrojen bağları aracılığıyla birbirine bağlanarak tabakalı bir düzen oluşturmaktadır (Iqbal vd., 2015; Jonas & Farah, 1998b). Araştırmacılar, üretim sürecinde selüloz molekülünün uzayarak bir şerit formunda sentezlendiğini bildirmektedir. Bu süreç, hidroksil gruplarının molekülün dış yüzeyine yönelmesine neden olmakta ve BS'nin yüksek su emme kapasitesinin temel kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca bu gerilme etkisinin, karbon ve hidrojen atomları arasında doğrudan bağ kurarak daha güçlü bir hidrofobik iç yapı oluşturduğu da belirtilmektedir (Klemm, Heublein, Fink, & Bohn, 2005).

BS, kristal ve amorf olmak üzere iki farklı bölgeye sahiptir. Kristal bölgeler düzenli ve paralel selüloz şeritlerinden oluşurken amorf bölgeler gelişigüzel yerleşmiş liflerden oluşmaktadır (Andritsou vd., 2018). Kristal bölgelerin oranı, BS'nin yüksek çekme mukavemetine doğrudan katkı sağlamakta olup tek bir BS lifinin Young modülünün 115 GPa'ya kadar ulaşabildiği rapor edilmektedir (Hsieh vd., 2008). BS ayrıca %95 ila %98 arasında değişen yüksek bir su tutma kapasitesine sahiptir ve bu da suda çözünen maddelerin emilimini kolaylaştırmaktadır (R. Rebelo vd., 2018). Bakteriyel selülozun yapısındaki suyun yaklaşık %10'u BS'nin yapısına kolayca girip çıkabilen serbest hacimsel su olarak kabul edilirken geriye kalan su ise hidrojen bağları aracılığıyla bağlanmış veya mevcut çok sayıda hidroksil grubuna bağlıdır (Portela, Leal, Almeida, & Sobral, 2019).

Sonuç olarak, BS'nin bitkisel selülozla paylaştığı temel kimyasal yapıya karşın sahip olduğu yüksek kristalinite, düşük lif çapı, üstün mekanik dayanım ve yüksek su tutma kapasitesi; bu materyali bitkisel selülozdan belirgin biçimde ayırmakta ve çok daha geniş bir uygulama yelpazesi için değerli bir hammadde konumuna taşımaktadır.

## 5. Bakteriyel Selülozun Kimyasal Özellikleri

Bakteriyel selülozun kimyasal özellikleri yaygın olarak Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ve X-ışını kırınımı (XRD) analizleri ile incelenmektedir. Bu analizler; BS yapısındaki kimyasal bağları, kristal yapıları ve selüloz tiplerini ortaya koymaktadır. Üretim yöntemine veya sentez sonrası uygulanan işlemlere bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik gösteren BS özelliklerinin belirlenmesi, karakterizasyon sürecinin temel gerekliliğini oluşturmaktadır.

BS, biyolojik kökeni sayesinde bitkisel selüloza kıyasla daha yüksek saflıktaki selüloz içeriğiyle öne çıkmaktadır. FTIR analizleri, selülozun O–H gerilmesini temsil eden  $3350\text{ cm}^{-1}$  bölgesindeki karakteristik piki ve  $1500\text{--}1235\text{ cm}^{-1}$  aralığındaki fonksiyonel pikleri öne çıkarmaktadır. C–H gerilmesine ait pik ise  $2690\text{ cm}^{-1}$  bölgesinde gözlemlenmektedir. Ayrıca  $\text{CH}_2$  bağlarının makaslama hareketi nedeniyle  $1424,18\text{ cm}^{-1}$ 'deki güçlü absorpsiyon bandı ve  $891\text{ cm}^{-1}$ 'deki geniş bant da literatürde gösterilmektedir (Mohite & Patil, 2014).

Alkali uygulama gibi kimyasal işlemlerin BS'nin yapısal özellikleri üzerindeki etkisi Srivastava ve arkadaşları tarafından değerlendirilmiştir. Doğal BS spektrumu ile kimyasal işlem uygulanmış olan spektrum kıyaslandığında, işlem görmemiş BS'de  $1533\text{ cm}^{-1}$ 'de bir Amid II absorpsiyon piki rapor edilmektedir. Bu durum; bakteri kaynaklı yüzey proteinleri ve amino asitlere ait amid varlığını, yani N–H gerilmesini temsil etmektedir. Kimyasal işlem uygulanmış BS örneklerinde ise bu pikin kaybolduğu görülmekte; bu durum yüzey safsızlıklarının etkin bir şekilde uzaklaştırıldığına göstergesi olarak değerlendirilmektedir (Srivastava & Mathur, 2025).

XRD analizi, bir malzemenin kristalinite derecesini belirlemede kullanılan temel araçlardan biridir. BS genel olarak Selüloz I ve Selüloz II olmak üzere iki farklı kristal form üretmektedir. Selüloz I yapısında  $\beta$ -1,4 glukoz zincirleri paralel olarak dizilirken Selüloz II'de moleküler zincirler antiparalel biçimde düzenlenmektedir. Her iki yapı da bitki ve mikroorganizmalardan elde edilen selüloz türlerinde yaygın olarak bulunmaktadır.

Bu iki yapı arasından Selüloz II, yapısında daha fazla sayıda hidrojen bağı barındırması nedeniyle daha kararlı bir yapıyı temsil etmektedir (Yu & Atalla, 1996). Doğal BS'ye ait XRD deseninde tipik olarak  $14^\circ$ ,  $16,5^\circ$  ve  $22^\circ$  olmak üzere üç ana difraksiyon piki gözlemlenmekte; bu pikler sırasıyla Selüloz Ia ve Ib fazlarını temsil eden (110), (110) ve (200) kırınım düzlemlerine karşılık gelmektedir. Söz konusu iki kristal faz, doğal BS'nin baskın yapısal bileşenini oluşturmaktadır (Maeda, Nakajima, Hagiwara, Sawaguchi, & Yano, 2006).

XRD analizi ayrıca BS'nin dayanıklı termal ve mekanik özellikleri açısından belirleyici bir parametre olan kristalinite yüzdesini de ortaya koymaktadır. Üretilen selülozun kristalinite derecesi büyük ölçüde kullanılan besiyeri türüne bağlıdır. Bakteri türleri standart sentetik ortam olan HS besiyerinde genel olarak daha yüksek kristaliniteye sahip selüloz üretmektedir. Bu bağlamda Kulkarni ve arkadaşları %93 oranında bir kristalinite değeri raporlamıştır (Kulkarni, Anil Dixit, & Singh, 2012).

Alkali işlemi ve ağartma gibi saflaştırma süreçleri, BS'nin moleküler yapısı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu işlemler safsızlıkları gidererek selüloz fibrillerinin daha düzenli bir şekilde yeniden hizalanmasını sağlamaktadır. Birbirini izleyen bu işlemlerin BS kristalinitesini kademeli olarak artırdığı bildirilmektedir: başlangıçta %53,3 olarak ölçülen kristalinite değeri alkali işlemi sonrasında %73'e, ardından uygulanan ağartma işlemiyle birlikte %80'e yükselmektedir. Bu artışın, alkali işlemi sırasında selüloz kristalit boyutunun 76,4 Å'dan 63,7 Å'a gerilemesiyle ilişkili olduğu belirtilmektedir (Han, Shim, & Kim, 2019).

Sonuç olarak, FTIR ve XRD analizleri BS'nin kimyasal saflığını, kristal yapısını ve uygulanan işlemlere bağlı yapısal dönüşümlerini kapsamlı biçimde ortaya koymaktadır. Saflaştırma işlemlerinin kristaliniteyi belirgin ölçüde artırdığı göz önüne alındığında, üretim sonrası uygulanan kimyasal işlemlerin BS'nin mekanik ve termal performansını doğrudan iyileştirdiği anlaşılmaktadır.

## **6. Bakteriyel Selülozun Termal Özellikleri**

Termogravimetrik analiz (TGA) ve diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC), bir malzemenin termal davranışını karakterize etmek amacıyla yaygın olarak kullanılan temel analiz yöntemleridir. TGA'da ısı uygulamasıyla kütlede meydana gelen değişimler ölçülerek BS'nin ağırlık kaybı davranışı ve termal bozunma kapasitesi ortaya koyulmaktadır. DSC ise malzemenin camsı geçiş sıcaklığını ve izotermal kristallenme karakteristiklerini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır.

TGA'da malzeme sürekli bir ısıtma programına tabi tutulmakta ve kütle değişimleri sıcaklığa karşı kaydedilmektedir. Geniş bir uygulama alanına sahip olan bu teknikte nem kaybı ve sıcaklığa bağlı bozunmadan kaynaklanan kütle değişimi değerlendirilerek malzemenin termal bozunma davranışının daha iyi anlaşılması sağlanmaktadır. Ham ve doğal BS üzerinde gerçekleştirilen analizlerde BS'nin çok basamaklı bir bozunma profili sergilediği rapor edilmiştir. İlk aşamada nem kaybı ve düşük molekül ağırlıklı bileşenlerin buharlaşmasından kaynaklanan bozunma gözlemlenirken bunu sıcaklığa bağlı polimer bozunması

izlemektedir. BS'nin tam bozunması ise yaklaşık 600 °C'de tamamlanmaktadır (Rathinamoorthy vd., 2021).

BS üretim ve saflaştırma süreçlerinde NaOH gibi alkali kimyasal işlemler yaygın biçimde uygulanmaktadır. Bu işlemler besiyeri kalıntıları ve ölü bakteri hücreleri gibi safsızlıkları uzaklaştırmak amacıyla gerçekleştirilmektedir.  $K_2CO_3$ ,  $Na_2CO_3$ , KOH ve NaOH ile muamele edilen BS örneklerinin termal bozunma özellikleri incelendiğinde, alkali işlemlerin bozunma başlangıç sıcaklığını 150 °C'den 275 °C'ye yükselttiği görülmektedir. Buna ek olarak, ilgili sıcaklık aralığında kütle kaybı oranı %26'dan %6–7 düzeyine gerilemiştir. Doğal BS'deki yüksek kütle kaybının yapıdaki safsızlıklarla ilişkili olduğu, alkali işleminin bu safsızlıkları gidermesiyle birlikte kütle kaybı oranının da belirgin ölçüde azaldığı değerlendirilmektedir (George, Ramana, Sabapathy, Jagannath, & Bawa, 2005).

DSC analizleri BS'nin camsı geçiş sıcaklığına ilişkin önemli bulgular ortaya koymaktadır. Analizlerde 121,3 °C'de bir endotermik pik gözlemlenmiş olup doğal BS'nin camsı geçiş sıcaklığı 165 °C olarak belirlenmiştir. Bu yüksek değerin, BS'nin sahip olduğu yüksek kristalinite oranından kaynaklandığı düşünülmektedir (Rathinamoorthy vd., 2021). TGA verileriyle tutarlı biçimde, BS'deki termal bozunma basamakları 80 °C'de başlamakta ve kristal fazın erimesi 80-140 °C aralığında gerçekleşmektedir. Doğal BS membranın bozunma yaşanmadan 343 °C'ye kadar dayanabildiği, bu sıcaklığın ötesinde ise polimorfik dönüşümün katı faz erimesiyle devam ettiği bildirilmektedir. BS'nin bu üstün termal kararlılığının yüksek kristalinite yüzdesiyle doğrudan ilişkili olduğu vurgulanmaktadır (Mohite & Patil, 2014).

Sonuç olarak, TGA ve DSC analizleri BS'nin termal davranışını kapsamlı biçimde ortaya koymaktadır. Çok basamaklı bozunma profili, yüksek camsı geçiş sıcaklığı ve 343 °C'ye kadar süren termal kararlılık; BS'nin yüksek kristalinite yapısının doğal bir yansımasıdır. Alkali saflaştırma işlemlerinin bozunma sıcaklığını belirgin ölçüde yükselttiği ve kütle kaybını azalttığı göz önüne alındığında, uygulanan kimyasal işlemlerin BS'nin termal performansını doğrudan iyileştirdiği anlaşılmaktadır.

## **7. Mekanik Özellikleri**

BS'nin mekanik özellikleri, temel olarak kimyasal yapısına ve morfolojik karakteristiklerine bağlıdır. Daha yüksek lif oryantasyonu ve kristalinite oranı, malzemenin mekanik strese karşı direncini artırmaktadır. Kristalinite derecesi, kullanılan bakteri kaynağına ve üretim yöntemine göre farklılık gösterdiğinden mekanik özellikler de buna bağlı olarak değişkenlik sergilemektedir. Bunun yanı sıra sentez sonrası uygulanan kimyasal işlemler, kullanılan kimyasal türüne bağlı olarak mekanik özellikleri olumlu ya da olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Ham

BS'nin çekme mukavemeti 13,83 kgf/cm<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir (Rathinamoorthy vd., 2021). HS besiyerinde *Gluconacetobacter hansenii* NCIM 2529 kullanarak BS üreten araştırmacılar, çalkalamalı kültür koşullarında 14,4 MPa çekme mukavemeti ve %97,3 uzama değeri bildirmektedir. Yapıdaki rastgele yönelmiş düzlemsel organizasyon nedeniyle artan su molekülü miktarının liflerin kaymasını kolaylaştırabileceği de rapor edilmektedir. Bu çalışmada bildirilen diğer önemli mekanik parametre olan Young modülü, malzemenin basma gerilmesi altındaki rijitliğini temsil etmektedir. Yüksek kristalinite oranına bağlı olarak Young modülü 15,71 N/mm<sup>2</sup> olarak kaydedilmiştir (Mohite & Patil, 2014).

BS'nin mekanik özellikleri, NaOH ve NaOCl kullanılarak gerçekleştirilen iki aşamalı saflaştırma işlemiyle belirgin biçimde iyileştirilebilmektedir. Bu işlem, kültüre edilmiş BS'deki protein içerikli materyaller ve kültür ortamı kalıntıları gibi safsızlıkları uzaklaştırarak nanoselüloz fibrillerinin doğal yapıya kıyasla daha düzenli bir şekilde hizalanmasına olanak tanımaktadır. Her saflaştırma adımı, BS'nin kristalinitesini kademeli olarak artırmakta ve bu değişim nihayetinde mekanik özelliklere yansımaktadır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, doğal BS'nin çekme mukavemetinin 88,9 MPa iken bu değerin tek aşamalı saflaştırma sonrasında 139 MPa'ya, iki aşamalı saflaştırma sonrasında ise 207 MPa'ya yükseldiği görülmektedir. Young modülünde de benzer bir artış gözlemlenmekte olup doğal BS için 7,6 GPa olan değer, tek aşamalı işlem sonrasında 14 GPa'ya, iki aşamalı işlem sonrasında ise 18 GPa'ya ulaşmaktadır (Gea vd., 2011).

Sonuç olarak, BS'nin mekanik performansı sabit bir değer olmayıp kristalinite oranı, lif oryantasyonu ve uygulanan saflaştırma işlemlerine bağlı olarak geniş bir aralıkta değişkenlik göstermektedir. Çekme mukavemeti ve Young modülündeki kademeli artışlar, kontrollü saflaştırma süreçlerinin BS'nin mekanik özelliklerini öngörülebilir ve sistematik biçimde iyileştirebildiğini ortaya koymaktadır.

## **8. Su Tutma Kapasitesi**

Su tutma kapasitesi, pek çok uygulama alanı için kritik öneme sahip bir malzeme özelliğidir. Özellikle hazır giyim ve tekstil endüstrilerinde nem yönetimi belirleyici bir rol oynamaktadır. Bu alanda yürütülen araştırmaların büyük çoğunluğu, ıslak haldeki su tutma ve su emme kapasiteleri üzerine yoğunlaşmaktadır. BS'nin yüksek su tutma kapasitesine katkıda bulunan temel unsurlar; yüksek kristalinite oranının yanı sıra yapısal gözeneklilik ve geniş yüzey alanıdır (Gelin vd., 2007). Üretim yöntemine, fibril düzenlemesine, yüzey alanına ve gözeneklilik derecesine bağlı olarak BS, kendi kuru ağırlığının 100 ile 200 katı arasında değişen su tutma kapasitesi sergileyebilmektedir. BS'de

özellikle fibril yapıları,  $\beta$ -1,4 glikozidik bağlarla birbirine bağlanan glukoz birimlerinin doğrusal dizilişleriyle oluşmaktadır. Su yapıya girdiğinde, bitişik glukoz birimleri arasında molekül içi ve moleküller arası hidrojen bağları kurulmaktadır. Bu durum, BS'nin yüksek su tutma kapasitesine destek olmaktadır (R. Rebelo vd., 2018). Kültür ortamının bileşimi, eklenen katkı maddeleri ve kullanılan bakteri suşu da üretilen lif yapısını ve dolayısıyla su tutma özelliklerini doğrudan etkileyen parametreler arasındadır. Su molekülleri kristal bölgelere nüfuz edemediğinden yüksek kristalinite oranı emme kapasitesini sınırlandırmakta; buna karşın geniş yüzey alanı ve gözenek hacmi, fiziksel hapsedilme ve hidroksil bağları aracılığıyla su emilimini artırmaktadır (Ul-Islam, Khan, & Park, 2012).

BS, su moleküllerini yapı içinde tutabilme kapasitesiyle öne çıkmaktadır. Bu özellik; malzemenin sürekli yara eksüdatını emmesinin beklendiği yara örtüsü gibi uygulamalarda özellikle kritik bir işlev görmektedir. Emme kapasitesi, BS'nin morfolojik yapısına ve uygulanan işlem yöntemlerine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Cazón ve arkadaşları, izoterm analizlerinde nem ve su molekülü ile selüloz arasındaki etkileşimin iki aşamalı bir mekanizmayla gerçekleştiğini bildirmektedir. İlk aşamada selüloz zincirindeki serbest bağlanma bölgeleri, hidroksil grupları aracılığıyla su molekülleriyle etkileşime girerek tekli bir tabaka oluşturmaktadır. İkinci aşamada ise kısmen etkileşime girmiş bağlar üzerinde çoklu tabaka oluşumu meydana gelmekte; bu durum serbest boşlukları ve gözenekleri doldurarak yapı içindeki toplam su hacmini artırmaktadır (Cazón, Velázquez, & Vázquez, 2020).

Çalkalamalı kültür yöntemiyle üretilen BS üzerinde gerçekleştirilen su tutma analizlerinde, doğal BS'nin su emme kapasitesi %400 olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada, üç boyutlu gözenekli yapıların su moleküllerini içeri çekmek için kılcal kuvvet oluşturduğu gösterilmiştir. Bunun yanı sıra, selüloz fibril ağları arasındaki yoğun hidrojen bağı oluşumu da yüksek su tutma kapasitesinin temel mekanizmaları arasında yer almaktadır. Genel bir değerlendirme olarak, çalkalamalı kültürden elde edilen BS'nin su tutma kapasitesinin statik kültürle üretilene kıyasla daha yüksek olduğu bildirilmektedir (Mohite & Patil, 2014). Karşılaştırmalı bir çalışmada ise ortama eklenen ilave materyal oranının artmasıyla lif çapının büyüdüğü ve matris içindeki gözenek hacminin azaldığı; bunun sonucunda BS'nin su tutma kapasitesinin gerilediği rapor edilmiştir (Ul-Islam vd., 2012).

Şişme testi kapsamında da 24 saat boyunca deiyonize suya daldırılan BS örneğinin, kendi kuru ağırlığının 60 katına ulaşan miktarda su emdiği ve şiştiği bildirilmiştir. Bu değer, standart hidrokolloid filmlere kıyasla oldukça yüksek

olup BS'nin üstün nem yönetimi kapasitesini açıkça ortaya koymaktadır (Lin, Lien, Yeh, Yu, & Hsu, 2013).

Sonuç olarak BS'nin su tutma ve emme özellikleri; gözenekli yapısı, geniş yüzey alanı ve yoğun hidrojen bağı açısından kaynaklanan çok katmanlı bir mekanizmaya dayanmaktadır. Üretim yöntemi ve lif yapısındaki değişkenlerin su tutma kapasitesini doğrudan etkilediği göz önüne alındığında, bu parametrelerin optimize edilmesi yara örtüsü ve tekstil gibi nem yönetiminin ön planda olduğu uygulamalar için belirleyici bir öneme sahiptir.

## **9. Bakteriyel Selülozun Saflaştırılması**

Farklı ham madde kaynaklarından sentezlenen BS, yapısal karakteristiklerinin yanı sıra fiziksel görünüm bakımından da çeşitlilik sergilemektedir. Standart üretim protokollerinde kullanılan HS besiyeri tipik olarak mat beyaz renkte bir selüloz matı oluşumuyla sonuçlanırken alternatif karbon ve azot kaynaklarının kullanımı besiyeri bileşenlerine bağlı olarak farklı verim oranlarında ve çeşitli renklerde BS sentezlenmesine olanak tanımaktadır (Wang vd., 2018). Ham halde elde edilen BS peliküllerinin, besiyeri kalıntıları ve ölü bakteri hücreleri gibi biyojenik safsızlıklardan arındırılması, malzemenin işlevselliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu doğrultuda literatürde yaygın olarak kabul gören yöntem, selüloz matının NaOH ile muamele edilerek saflaştırılması ve ardından nötralizasyon işleminin gerçekleştirilmesidir.

Bitkisel selülozun saflaştırılmasında yaygın olarak kullanılan NaOH, BS üretim süreçlerinde de belirleyici bir işlev üstlenmektedir. NaOH çözeltisi, selüloz yapısının amorf bölgelerine nüfuz ederek bünyedeki safsızlıkları hidrolize etmekte; ardından gerçekleştirilen durulama işlemiyle yeni kristalin kafeslerin düzenli biçimde organize olmasına zemin hazırlamaktadır. Fermantasyon aşamasının ardından ham BS matına uygulanan bu işlem; yapıdaki proteinlerin, nükleik asitlerin ve diğer selülozik olmayan biyolojik bileşenlerin etkin biçimde uzaklaştırılmasını sağlamaktadır (Han vd., 2019). NaOH konsantrasyonu aynı zamanda malzemenin boyutsal kararlılığı üzerinde doğrudan belirleyici bir rol oynamaktadır. Alkali derişiminin %2'den %4'e yükselmesinin belirgin bir büzülmeye yol açtığı, maksimum büzülme oranının ise %10 konsantrasyonda gözlemlendiği rapor edilmiştir. Bu bulgular doğrultusunda BS'nin morfolojik karakterini ve yapısal bütünlüğünü korumak amacıyla saflaştırma protokollerinde %10'un altındaki alkali derişimleri tercih edilmektedir (Wu, 2018).

Sonuç olarak, BS'nin fiziksel görünümü ve saflık derecesi; kullanılan besiyeri bileşimine ve uygulanan saflaştırma protokolüne bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik göstermektedir. NaOH ile gerçekleştirilen alkali saflaştırmanın

biyojenik safsızlıkları etkin biçimde giderdiği ve kristal yapının yeniden organizasyonuna katkı sağladığı görülmektedir. Bununla birlikte, alkali derişiminin dikkatli biçimde kontrol edilmesi; malzemenin boyutsal kararlılığını ve yapısal bütünlüğünü koruma açısından kritik bir parametre olarak öne çıkmaktadır.

## **10. Doku Mühendisliği ve Yara Örtüsü Uygulamalarında Bakteriyel Selüloz**

BS, %80-90 aralığındaki yüksek kristalinite indeksi (Fernandes, Gama, Dourado, & Souto, 2019), üstün su tutma kapasitesi (Cazón vd., 2020) ve 8000'e kadar ulaşan oldukça yüksek polimerizasyon derecesi (Cazón vd., 2020) gibi karakteristik fizikokimyasal özelliklere sahip olmasının yanı sıra biyoyumlu olması nedeniyle biyomedikal ve biyoteknoloji uygulamaları başta olmak üzere sağlık ve tıp endüstrileri gibi farklı sektörlerde stratejik bir hammadde olarak ön plana çıkmaktadır (R. Rebelo vd., 2018).

BS'nin en belirgin özelliklerinden biri, toksik olmaması ve immünojenik yapı sergilememesi sayesinde sahip olduğu üstün biyoyumluluğudur. Bu özellikler, BS'nin implantasyon sonrasında olumsuz bağışıklık tepkilerine yol açmamasını sağlamakta; bu da materyali yara iyileştirme, kemik onarımı ve deri rejenerasyonu gibi tıbbi uygulamalar için özellikle avantajlı kılmaktadır. Bunun yanı sıra BS'nin biyobozunur yapısı, vücut içinde zararlı kalıntı bırakmadan doğal olarak parçalanabilmesine olanak tanımakta; bu özellik, rejeneratif tıptaki geçici iskele uygulamaları için kritik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır.

Mekanik performans açısından Tan ve arkadaşları, kontrollü lif hizalaması yoluyla 115 MPa'ya kadar çekme mukavemeti elde edilen yönelimli BS mikrolifi iskelelerinin üretimini gerçekleştirmiştir. Bu iskelelerin düşük sitotoksitesi ve kök hücrelerinde kalsiyum birikimini teşvik eden osteojenik potansiyeli, kemik doku mühendisliğindeki kullanım değerini doğrulamaktadır (Lu vd., 2025).

Yara iyileştirme açısından BS; üstün biyoyumluluğu, yüksek nem tutma kapasitesi ve hücresel büyümeyi destekleme yeteneği sayesinde önemli bir materyal olarak öne çıkmaktadır. BS iskelesi, hücre tutunması, göçü ve proliferasyonu için elverişli bir ortam oluşturmakta; gözenekli yapısı ve nanofibril ağıyla hücre dışı matriksi taklit ederek hücresel infiltrasyonu kolaylaştırmakta ve doku rejenerasyonunu desteklemektedir. Aynı zamanda yara bölgesini dış etkenlerden koruyan geçici bir bariyer işlevi gören BS iskeleleri, nemli ortam oluşturarak iyileşmeyi hızlandırmaktadır (Field, Ratcliffe, Johnson, Binger, & Reynolds, 2024).

BS'nin esneklik ve çekme mukavemeti dahil mekanik dayanımı, yara bölgesindeki dinamik kuvvetlere karşı direnç sağlamakta; epidermis ve dermis



tabakalarının yenilenmesine katkıda bulunarak uygulama sonrası ilk iki hafta içinde yara alanında belirgin bir azalma sağlamaktadır (Sun, Dong, Meng, Xu, & Wang, 2024).

Diyabetik ülserler ve venöz ülserler gibi kronik yaralar, uzun iyileşme süreleri ve enfeksiyona yatkınlık nedeniyle önemli klinik zorluklar doğurmaktadır. BS bazlı iskelelerin hidrofilik yapısı, yara bölgesinde optimum nem dengesini koruyarak bu tür yaralardaki bozulmuş iyileşme sürecini desteklemektedir. Bunun yanı sıra BS, granülasyon dokusu oluşumunu teşvik etmekte ve deri rejenerasyonunda anahtar rol oynayan keratinosit ile fibroblast proliferasyonunu desteklemektedir. Gümüş nanoparçacıkları (AgNP) ile hazırlanan BS kompozitlerinin ise yeniden epitelizasyonu kolaylaştırdığı, enfeksiyona karşı koruyucu bir bariyer oluşturduğu ve enflamatuvar yanıtı azalttığı; bu sayede çift yönlü bir işlevsellik sergilediği bildirilmektedir (Hu vd., 2021).

Sonuç olarak BS; biyouyumluluğu, biyobozunurluğu, üstün mekanik özellikleri ve ECM'i taklit eden nanofibril yapısıyla yara iyileştirmeden kemik onarımına, kronik yara yönetiminden akıllı tekstillere uzanan geniş bir uygulama yelpazesi için çok yönlü ve klinik açıdan değerli bir biyomalzeme olduğunu kanıtlamaktadır.

## KAYNAKÇA

- Andritsou, V., De Melo, E. M., Tsouko, E., Ladakis, D., Maragkoudaki, S., Koutinas, A. A., & Matharu, A. S. (2018). Synthesis and Characterization of Bacterial Cellulose from Citrus-Based Sustainable Resources. *ACS Omega*, 3(8), 10365–10373.
- Cannon, R. E., & Anderson, S. M. (1991). Biogenesis of bacterial cellulose. *Critical Reviews in Microbiology*, 17(6), 435–447.
- Cazón, P., Velázquez, G., & Vázquez, M. (2020). Bacterial cellulose films: Evaluation of the water interaction. *Food Packaging and Shelf Life*, 25, 100526.
- Embuscado, M. E., Marks, J. S., & BeMiller, J. N. (1994). Bacterial cellulose. II. Optimization of cellulose production by *Acetobacter xylinum* through response surface methodology. *Food Hydrocolloids*, 8(5), 419–430.
- Fernandes, M., Gama, M., Dourado, F., & Souto, A. P. (2019). Development of novel bacterial cellulose composites for the textile and shoe industry. *Microbial Biotechnology*, 12(4), 650–661.
- Field, E. H., Ratcliffe, J., Johnson, C. J., Binger, K. J., & Reynolds, N. P. (2024). Self-healing, biocompatible bioinks from self-assembled peptide and alginate hybrid hydrogels. *BioRxiv*, 2024.06.19.599807.
- Gea, S., Reynolds, C. T., Roohpour, N., Wirjosentono, B., Soykeabkaew, N., Bilotti, E., & Peijs, T. (2011). Investigation into the structural, morphological, mechanical and thermal behaviour of bacterial cellulose after a two-step purification process. *Bioresource Technology*, 102(19), 9105–9110.
- Gelin, K., Bodin, A., Gatenholm, P., Mihranyan, A., Edwards, K., & Strømme, M. (2007). Characterization of water in bacterial cellulose using dielectric spectroscopy and electron microscopy. *Polymer*, 48(26), 7623–7631.
- George, J., Ramana, K. V., Sabapathy, S. N., Jagannath, J. H., & Bawa, A. S. (2005). Characterization of chemically treated bacterial (*Acetobacter xylinum*) biopolymer: Some thermo-mechanical properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 37(4), 189–194.
- Guhados, G., Wan, W., & Hutter, J. L. (2005). Measurement of the elastic modulus of single bacterial cellulose fibers using atomic force microscopy. *Langmuir : The ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 21(14), 6642–6646.
- Han, J., Shim, E., & Kim, H. R. (2019). Effects of cultivation, washing, and bleaching conditions on bacterial cellulose fabric production. *Textile Research Journal*, 89(6), 1094–1104.
- Hsieh, Y. C., Yano, H., Nogi, M., & Eichhorn, S. J. (2008). An estimation of the Young's modulus of bacterial cellulose filaments. *Cellulose*, 15(4), 507–513.

- Hu, X. Le, Shang, Y., Yan, K. C., Sedgwick, A. C., Gan, H. Q., Chen, G. R., ... Chen, D. (2021). Low-dimensional nanomaterials for antibacterial applications. *Journal of Materials Chemistry. B*, 9(17), 3640–3661.
- Hwang, J. W., Yang, Y. K., Hwang, J. K., Pyun, Y. R., & Kim, Y. S. (1999). Effects of pH and dissolved oxygen on cellulose production by *Acetobacter xylinum* BRC5 in agitated culture. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 88(2), 183–188.
- Iqbal, H. M. N., Kyazze, G., Locke, I. C., Tron, T., & Keshavarz, T. (2015). Development of bio-composites with novel characteristics: Evaluation of phenol-induced antibacterial, biocompatible and biodegradable behaviours. *Carbohydrate Polymers*, 131, 197–207.
- Jonas, R., & Farah, L. F. (1998a). Production and application of microbial cellulose. *Polymer Degradation and Stability*, 59(1–3), 101–106.
- Jonas, R., & Farah, L. F. (1998b). Production and application of microbial cellulose. *Polymer Degradation and Stability*, 59(1–3), 101–106.
- Klemm, D., Heublein, B., Fink, H. P., & Bohn, A. (2005). Cellulose: Fascinating biopolymer and sustainable raw material. *Angewandte Chemie - International Edition*, 44(22), 3358–3393.
- Klemm, D., Kramer, F., Moritz, S., Lindström, T., Ankerfors, M., Gray, D., & Dorris, A. (2011). Nanocelluloses: A new family of nature-based materials. *Angewandte Chemie - International Edition*, 50(24), 5438–5466.
- Kulkarni, P. K., Anil Dixit, S., & Singh, U. B. (2012). Evaluation of bacterial cellulose produced from *Acetobacter xylinum* as pharmaceutical excipient. *American Journal of Drug Discovery and Development*, 2(2), 72–86.
- Lin, W. C., Lien, C. C., Yeh, H. J., Yu, C. M., & Hsu, S. H. (2013). Bacterial cellulose and bacterial cellulose-chitosan membranes for wound dressing applications. *Carbohydrate Polymers*, 94(1), 603–611.
- Loh, J., Arnardottir, T., Gilmour, K., Zhang, M., & Dade-Robertson, M. (2025). Enhanced production of bacterial cellulose with a mesh dispenser vessel-based bioreactor. *Cellulose* 2025 32:4, 32(4), 2209–2226.
- Lu, W., Chen, H., Liu, T., Hu, J. H., Zhu, L. W., Tao, X. H., ... Du, Y. Z. (2025). Serine-modified silver nanoparticle porous spray membrane: A novel approach to wound infection prevention and inflammation reduction. *International Journal of Pharmaceutics*, 670, 125120.
- Maeda, H., Nakajima, M., Hagiwara, T., Sawaguchi, T., & Yano, S. (2006). Bacterial cellulose/silica hybrid fabricated by mimicking biocomposites. *Journal of Materials Science* 2006 41:17, 41(17), 5646–5656.

- Masaoka, S., Ohe, T., & Sakota, N. (1993). Production of cellulose from glucose by *Acetobacter xylinum*. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 75(1), 18–22.
- Mohite, B. V., & Patil, S. V. (2014). Physical, structural, mechanical and thermal characterization of bacterial cellulose by *G. hansenii* NCIM 2529. *Carbohydrate Polymers*, 106(1), 132–141.
- Portela, R., Leal, C. R., Almeida, P. L., & Sobral, R. G. (2019). Bacterial cellulose: a versatile biopolymer for wound dressing applications. *Microbial Biotechnology*, 12(4), 586–610.
- R. Rebelo, A., Archer, A. J., Chen, X., Liu, C., Yang, G., & Liu, Y. (2018). Dehydration of bacterial cellulose and the water content effects on its viscoelastic and electrochemical properties. *Science and Technology of Advanced Materials*, 19(1), 203–211.
- Rathinamoorthy, R., Aarthi, T., Aksaya Shree, C. A., Haridharani, P., Shruthi, V., & Vaishnikka, R. L. (2021). Development and Characterization of Self - assembled Bacterial Cellulose Nonwoven Film. *Journal of Natural Fibers*, 18(11), 1857–1870.
- Sharma, C., Bhardwaj, N. K., & Pathak, P. (2021). Static intermittent fed-batch production of bacterial nanocellulose from black tea and its modification using chitosan to develop antibacterial green packaging material. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123608.
- Shoda, M., & Sugano, Y. (2005). Recent advances in bacterial cellulose production. *Biotechnology and Bioprocess Engineering* 2005 10:1, 10(1), 1–8.
- Son, H. J., Kim, H. G., Kim, K. K., Kim, H. S., Kim, Y. G., & Lee, S. J. (2003). Increased production of bacterial cellulose by *Acetobacter* sp. V6 in synthetic media under shaking culture conditions. *Bioresource Technology*, 86(3), 215–219.
- Sozcu, S., Frajova, J., Wiener, J., Venkataraman, M., Tomkova, B., & Militky, J. (2025). Synthesis of *Acetobacter xylinum* Bacterial Cellulose Aerogels and Their Effect on the Selected Properties. *Gels* 2025, Vol. 11, 11(4).
- Sözcü, Ş., Wiener, J., Frajová, J., Venkataraman, M., Tomková, B., Kalmár, J., ... Militký, J. (2026). Effect of drying methods on *Acetobacter xylinum* bacterial cellulose aerogels and cryogels. *Scientific Reports* 2026 16:1, 16(1), 12264-.
- Srivastava, S., & Mathur, G. (2025). Investigating the effect of alkali treatment on physicochemical characteristics of bacterial cellulose synthesized by *Komagataeibacter saccharivorans* BC-G1. *The Microbe*, 7, 100340.
- Sun, Q., Dong, X., Meng, Q., Xu, J., & Wang, T. (2024). Reversible Schiff Base Chemistry in Arginine-Grafted Regenerated Cellulose Hydrogel: Integration

of Chitosan and Zinc Ions for Enhanced Hemostasis, Antibacterial Action, and Accelerated Wound Healing. *ACS Applied Bio Materials*, 7(10), 7030–7039.

- Ul-Islam, M., Khan, T., & Park, J. K. (2012). Water holding and release properties of bacterial cellulose obtained by in situ and ex situ modification. *Carbohydrate Polymers*, 88(2), 596–603.
- Vieira, S., Silva-Correia, J., Reis, R. L., & Oliveira, J. M. (2022). Engineering Hydrogels for Modulation of Material-Cell Interactions. *Macromolecular Bioscience*, 22(10), 2200091.
- Wang, S. S., Han, Y. H., Chen, J. L., Zhang, D. C., Shi, X. X., Ye, Y. X., ... Li, M. (2018). Insights into Bacterial Cellulose Biosynthesis from Different Carbon Sources and the Associated Biochemical Transformation Pathways in *Komagataeibacter* sp. W1. *Polymers*, 10(9), 963.
- Wu, X. (2018). Control of the mechanical behavior of bacterial cellulose by mercerization (Yüksek lisans tezi). Case Western Reserve University, Cleveland, OH.
- Ye, J., Zheng, S., Zhang, Z., Yang, F., Ma, K., Feng, Y., ... Yang, X. (2019). Bacterial cellulose production by *Acetobacter xylinum* ATCC 23767 using tobacco waste extract as culture medium. *Bioresource Technology*, 274, 518–524.
- Yu, X., & Atalla, R. H. (1996). Production of cellulose II by *Acetobacter xylinum* in the presence of 2,6-dichlorobenzonitrile. *International Journal of Biological Macromolecules*, 19(2), 145–146.



## *BÖLÜM 9*

# Pomza, Perlit ve Zeolit Malzemelerinin Tekstil Sektöründe Kullanılabilirliğine Genel Bir Bakış

*Nükhet Şapcı<sup>1</sup> & Havva Tokgöz<sup>2</sup>*

## GİRİŞ

Pomza; volkanik aktiviteler sonucu meydana gelmiş silikat esaslı, birbirine bağlantısız gözenekli, camsı, amorf, doğal bir kayadır. Dilimizde sünger taşı, hışır taşı, topuk taşı gibi adlar alan bu kayaç, asidik ve bazik olarak ikiye ayrılır. En yaygın kullanımı olan pomzalar asidik pomzalardır. Pomzaların genel kimyasal bileşen analizi tablo 1’de verilmiştir (Köse H., Pamukçu Ç. vd. 1997).

Pomza kendine özgü rengi, gözenekliliği, kristal suyunun olmaması gibi özellikleri bakımından kendine benzeyen volkanik kayaçlardan (perlit, zeolit, obsidyen) ayrılır. Kimyasal olarak pomza %75 oranında silis içerebilir. %15 civarında  $Al_2O_3$  içermesi, pomzaya yüksek ateş ve ısı dayanımı özelliği kazandırmıştır. Mohs skalasına göre sertliği de 5-6’dır. Özgül ağırlığı 1-2 gr/cm<sup>3</sup>’tür. Ancak bu değer tüvenan pomza için geçerli olan bir değerdir. Tüvenan pomza kırma, eleme ve boyutlandırma sonrasında, iri boyutlardaki pomza agregalarının yoğunluğu yukarıda belirtilen değerden daha düşük olabilir (Gündüz, L.,2005). Özellikle koruyucu tekstil üretiminde pomzanın rengi en önemli özelliğidir. Çünkü asidik karakterli pomzalar beyaz, kirli beyaz, açık gri renklerinde olabilmektedir.

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, ORCID: 0000-0002-8390-9134

<sup>2</sup> Yük. Tekstil Müh., Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0003-1971-8218

**Tablo 1.** Pomza Kimyasal Bileşen Analizi (Köse, H., Pamukçu, Ç., 1997)

| Bileşen                            | İçerik (%) |
|------------------------------------|------------|
| SiO <sub>2</sub>                   | 60-75      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 13-15      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 1-3        |
| CaO                                | 1-2        |
| MgO                                | 1-2        |
| Na <sub>2</sub> O-K <sub>2</sub> O | 7-8        |
| TiO <sub>2</sub>                   | Eser       |
| SO <sub>2</sub>                    | Eser       |
| Cl                                 | Eser       |

Perlit kayacı ise, asidik karakterli volkanik bir camdır. Perlit saydam açık griden parlak siyaha kadar uzanan bir renk skalası vardır. Perlitin ısıyla genleşme özelliği vardır. Bu özelliği ile hafif ve gözenekli bir yapıya dönüşür. Genleştiğinde rengi beyaza döner. Perlit, ilk hacminin 20 katı kadar genleşebilir. Perlitin en önemli özelliği, hidrasyona uğramış camsı silika yapıdaki %2,5 bileşik halinde su içermesidir ve bu su perlitin kararlılığını oluşturmaktadır. Ham perlit bileşimi nedeniyle alüminyum ve silisli bileşikler içerdiğinden kalsiyum esaslı bağlayıcılar ile reaksiyona girerek hidrolik aktivite gösterir. Ağır metal, fosfor, radyoaktif element ve organik madde içermez. Dolayısıyla kimyasal içerik bakımından saftır. Türkiye, dünya çapında en zengin perlit rezervlerine sahip ülkelerden biridir. Ancak ülkemizin perlit kaynakları ve üretim kapasitesi oldukça yüksek olmasına rağmen, yurt içi talep sınırlı kalmaktadır. Çok iyi bir yalıtım malzemesi olan perlit, yurt içi tüketimde gerekli ivmeyi kazanamamıştır. (<https://www.mta.gov.tr/>)

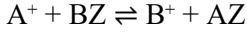
Zeolitik tüfler, hafif, oldukça fazla gözeneğe sahip, homojen özellikte, sağlam yapıdadırlar. Kolayca kesilip işlenebildikleri için hammadde olarak kullanılabilirler. Genleştirilmiş zeolitlerin sıkışma ve aşınmaya karşı dayanımları oldukça yüksektir. Kirlilik kontrolünde, aktifleştirilmiş zeolit, genleştirilmiş perlit, sodyum karbonat, tartarik asit ve %20 oranında metilsiloksan içeren bir bağlayıcı ile peletlenmiş halde kullanılabilir. Özgül ağırlığı 0,5 gr/ cm<sup>3</sup>tür ve yağ absorblama kapasitesi 0,97 gr'dır. Çevre kirliliğini önlemek için atık sularda istenmeyen ağır metal katyonları zeolitler tarafından kolayca tutulmaktadır, nükleer santral atıklarında bulunan Sr, Cs, Co, Ca gibi izotoplar zeolitlere tutunabilmektedir ve deterjanlardaki fosfat kullanımı yerine de zeolit tercih edilebilmektedir. (<https://www.mta.gov.tr/>)

Pomza, perlit ve zeolit hakkında verilen bu literatür bilgilerinden sonra, esas çalışmanın amacı olan bu malzemelerin mikronize olarak tekstil sektöründe



kullanımları hakkında dünya üzerinde yapılan çalışmalar aşağıda özetle derlenmeye çalışılmıştır.

Bozoğlu, A., 2010, yapmış olduğu tez çalışmasında zeolitlerde gözlenen iyon değişimini, aşağıda verilen tepkimeyle açıklamıştır.



Bu tepkimede, A iyonlarını içeren bir çözelti, B iyonlarını taşıyan bir zeolit ile temas eder ve çözeltideki A iyonları, zeolit yapısındaki B iyonlarının yerini alır.

Gong, Wang ve Cao, 2008 yılında yapmış oldukları bir ArGe çalışması ile antibakteriyel ayakkabı astarı geliştirmiştir.

Zhang, Yue ve Shao ise 2004 yılında yapmış olduğu çalışmalarda zeolit malzemesi kullanarak antibakteriyel viskoz lif üretiminde başarılı olmuşlardır.

Öncü, G., ve Şapcı, N. 2025 yılında yapmış oldukları bir çalışmada, %100 pamuk ve %100 polyester olmak üzere iki farklı kumaş kullanılmıştır. 28\*36 cm ebatındaki numuneler %0, %4, %8, %12 oranlarında 60 gram pat kullanılarak kaplama makinası ile 50 µm mikronize pomza ile kaplanmıştır. Kaplanan kumaşların hava geçirgenlik, güç tutuşurluk ve yırtılma mukavemetleri incelenmiştir. Hava geçirgenlik özelliği incelendiğinde, kaplama oranı arttıkça hem pamuk hem de polyester kumaşlarda hava geçirgenlik özelliğinin düştüğü gözlenmiştir. %12'lik pomza ile kaplı pamuklu kumaşın, pomza kaplamasız kumaşa göre tutuşma süresinin 4,2 kat, polyester kumaşlarda ise en yoğun kaplamalı ve kaplamsız kumaşlar karşılaştırıldığında tutuşma süresinin 2 kat uzadığı gözlenmiştir. Pomza ile kaplanmış polyester kumaşa erime eğilimi yüksek olması nedeniyle güç tutuşurluk özellikleri, pamuklu kumaşa göre daha düşük derecededir. Yırtılma mukavemetlerinde ise, her iki numune türünde de kaplama oranları arttıkça hem atkı hem de çözgü yönünde yırtılma mukavemetlerinin de arttığı saptanmıştır.

Nilanto, R. ve Alimul, M. 2024 yılında yapmış oldukları bir çalışmada, denim yıkama endüstrisinde düşük maliyeti nedeniyle enzimle veya taşlama proseslerinde pomza taşının yaygın bir şekilde kullanıldığını belirtmişlerdir. Ancak pomza taşının yoğun kullanımı arıtma tesislerinde aşırı çamur oluşumu daha fazla su tüketimi ve özellikle hafif yıkamalarda bile kumaş hasarı riskinin artması gibi sürdürülebilirlik problemlerine karşı eco taş malzemesinin performansını incelemişlerdir. Eco taş daha az su tüketmekte, daha az çamur oluşturmakta, pürüzsüz yüzeyi sayesinde giysilerde fiziksel hasar riskini azaltmakta ve denim yıkama uygulamaları için daha sürdürülebilir alternatif bir malzeme olduğunu savunmuşlardır.

Bengi Bozkır, 2019 yılında yapmış olduğu tez çalışmasında, polimerik malzemelerin gündelik yaşamda inşaat sektörü, gıda ve tekstil sektörü gibi birçok

alandan kullanıldığını belirtmiştir. Örnek olarak; pencere profili, yer karoları, borular, boyalar, gıda ambalajları, sıvı yağ şişeleri, su içme şişeleri, mutfak eşyaları, oyuncaklar ve ayakkabı tabanları sıralanabilir. Bu malzemelerin kimyasal ve hava koşullarına karşı dayanıklı, düşük maliyetli, yüksek elektriksel iletkenlik özelliklere sahip malzemeler olduğunu belirtmiştir. Polimerik malzemelere ilave olarak dolgu malzemeleri kullanıldığında üstün özelliklere sahip nanokompozitlerin elde edildiğini belirtmişlerdir. Yaptığı çalışma, kütlece %5 organozeolit içeren polimer/dolgu nanokompozitler çözeltilerin birleştirilmesi ile hazırlanmıştır ve geleneksel kompozitlere göre üstün özelliklere sahip yeni malzemeler elde etmek amaçlanmıştır. Sonuçta, ülkemizde ve dünyada bol bulunan zeolitleri ve perlitleri dolgu malzemesi olarak ve farklı polimerler matris olarak kullanılarak yeni malzemeler üretilebileceğini belirtmişlerdir. Böylece ülkemizdeki perlit ve zeolit kaynaklarından da iyi bir şekilde yararlanma sağlanacaktır.

Bahar Tiber, 2011 yılında yaptığı tez çalışmasında, %100 pamuk gabardin üzerine ham ve geliştirilmiş perlit kaplamıştır. Kumaşların yapısı ve kaplama kalınlığı için SEM, FTIR ölçümleri yapılmıştır. Kumaşlara, kumaş kalınlığı, mukavemet, hava geçirgenliği, dökümlülük gibi fiziksel testler ve su iticilik, su buharı geçirgenliği, temas açısı ölçümü gibi kimyasal testler de uygulanmıştır. Dikey, yatay, eğik yakma testleri ve LOI ölçümü yapılmıştır. Kumaşların antibakteriyallik, akustik, ısı, nem iletim, UV geçirgenlik gibi özelliklerini incelemiştir. Perlitin kumaş mukavemetini artırdığını, yıkama sonrası mukavemetin de bir miktar daha arttığını belirtmişlerdir. Ancak Perlit kaplanmış kumaşların dökümlülüğünün azaldığı görülmüş ve genleşmiş perlit kaplı kumaşın dökümlülük özelliğinin daha iyi olduğunu saptamıştır. Kumaş pürüzlülüğünde, pürüzlülüğün azaldığı ve genleşmiş perlit kaplanan kumaşın pürüzlülük oranının daha düşük olduğunu tespit etmiştir. Tiber yapmış olduğu tez çalışmasında hava geçirgenlik özelliği testi de yapmıştır. Hava geçirgenlik özelliğinde ise, ham perlit ile kaplanan kumaşın geçirgenlik özelliğinin, genleşmiş perlit ile kaplanan kumaşa göre daha düşük olduğunu tespit etmiştir. Ham perlit ile çift taraflı olarak kaplanan kumaşın, diğer kumaşlara göre daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir. Perlit uygulanan kumaşların bir miktar su iticilik kazandırdığı ancak su itici denilebilmesi için yeterli olmadığı tespit edilmiştir. Su buharı geçirgenliğinde ise azalttığı ve ham perlitte bu oranın daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Perlit kaplanmış kumaşların, antibakteriyal özellik kazandırmadığını belirtmiştir. Yapılan yanma testlerinde ise, kaplanmış kumaşların alev yayılma süresi ve hızında olumlu sonuçlar elde edildiğini belirtmiştir. Kaplanmış kumaşların ısı iletkenliklerinin, işlem görmemiş kumaşa göre daha fazla olduğunu gözlemlemiştir.

Öncü ve Şapcı, 2023’de yaptıkları bir çalışmada, pamuk ve poliester kumaşlar kaplanarak bu kumaşların fiziksel özellikleri (UV – ultraviyole koruma ve alev geciktiricilik) incelenmiştir. Ayrıca kumaşların yüzey özellikleri taramalı

elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) ve temas açısı analizi ile değerlendirilmiştir. Numuneler için, düz dokuma (1/1) yapısında iki farklı kumaş (pamuk ve polyester) kullanılmıştır. Yıkanmış ve ağartılmış pamuklu kumaş 258 g/m<sup>2</sup> ağırlığında olup, çözgü sıklığı 32 tel/cm ve atkı sıklığı 22 tel/cm'dir. Polyester kumaş ise 262 g/m<sup>2</sup> ağırlığında, çözgü sıklığı 23 tel/cm ve atkı sıklığı 20 tel/cm'dir. Kumaşların test aşamasında, 40 µm mikronize pomza içeren kaplama pastaları farklı konsantrasyonlarda (0, 3, 6, 9, 12 ve 15%) hazırlanmış ve 28×36 cm hem pamuklu hem polyester kumaş numunelerine ATAÇ marka laboratuvar tipi kaplama makinesi 80 g kaplama pastası kullanılarak uygulanmıştır. Hem pamuklu hem polyester kumaşlarda en yüksek temas açısı değeri %3 pomza kaplamasında elde edilmiştir. Ancak, pomza malzemesinin kendisinin %18,75 su emme oranına sahip olması nedeniyle, pomza oranı arttıkça su iticilik ve temas açısı değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. Çalışmada, pamuklu ve polyester kumaşlar farklı oranlarda (%3, %6, %9, %12 ve %15) pomza taşı ile kaplanmıştır. Deneysel analiz sonuçları incelenmiştir. Pomza malzemesinin yüksek oranda SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriğine sahip olduğu, bu bileşimin ise tüm deneysel sonuçlarda olumlu etki yarattığı belirlenmiştir. Pomza ile kaplanmış pamuklu ve polyester kumaşlarda, ham (kaplanmamış) kumaşlara göre yanma süresinde belirgin bir gecikme gözlemlenmiştir. Özellikle %15 pomza ile kaplanmış pamuklu kumaşların alev geciktirici özelliklerinde olumlu değişimler tespit edilmiştir. Ayrıca, pomza ile kaplanmış polyester kumaşların UPF değeri mükemmel koruma sağlamış, bu da onları koruyucu tekstil uygulamaları için uygun hale getirmiştir. Elde edilen bulgular, pomza taşının alev geciktirici kumaş üretiminde verimli bir katkı malzemesi olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Bu veriler, teknik ve koruyucu tekstiller üzerine yapılacak gelecekteki çalışmalara temel oluşturacaktır.

Günümüzde, karmaşık yöntemler yerine düşük maliyetli, çevre dostu doğal malzemelerin kullanımı ile nihai ürünlerin özelliklerinin geliştirilmesi çalışması tekstil sektöründe de diğer sektörler gibi ön plana çıkmaktadır.

Akçal ve Bulut, 2022 yılında yapmış oldukları bir çalışmada, %100 poliester esaslı dokuma kumaşlara katı partiküllü pomza, amorf silika ve kolemanit katkı malzemeleri ile pigment baskı yöntemi ile kaplanması ve sol-jel ile de baskı fiksajı işlemi gerçekleştirmiştir. Farklı katkı oranları ile gerçekleştirilen baskı işlemleri sonrası mevcut kumaşların yüzey analizleri yapılmıştır. Mukavemet, aşınma direnci, UV koruma ve hava geçirgenliği, özellikleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Çalışmalarında, farklı alanlarda kullanım imkanı bulacak, düşük sıcaklık, düşük enerji maliyetine sahip, minimum kimyasal kullanımına olanak sağlayan yeni bir adım geliştirdiklerini belirtmişlerdir. Baskı işleminde, standart baskı yerine sadece kıvamlaştırıcı kullanılmıştır. Sol jel yöntemi seçiminde katkı malzemesi olarak kullanımı söz konusu olan pomza, amorf silika ve kolemanit maddelerinin zeta potansiyelleri incelenerek bazik katalizli bir sol jel yöntemi seçilmiştir. Gerçekleştirilen yüzey görüntülemeleri, EDS ve FTIR

analizleri sonucunda katkı malzemelerinin sahip olduğu yapısal elementler kumaşa aktarılmıştır. Bu durum kumaş numunelerinde farklı kimyasal bağların oluşmasına ve farklı fonksiyonel özellikler göstermesine katkıda bulunduğunu belirtmişlerdir. Elde ettikleri test sonuçlarına göre, oluşturulan işlem adımları ile işlemsiz poliester kumaş numunelerine göre kopma mukavemeti, %kopma uzaması ve yırtılma mukavemeti değerlerinde iyileşmeler gösterdiği, UV geçirgenlik sonuçları ile özellikle amorf silika malzemesi kullanımı sonrası poliester kumaşta UV koruma özelliğinin iyi değer aralığına ulaştığını, aşınma direncine karşı kumaş davranışlarının olumlu yönde geliştirdiğini belirtmişlerdir.

Şapcı ve Öncü 2025 yılında yaptıkları çalışmada, poliester, keten ve pamuk ipliklerinden dokunan üç farklı kumaş türünü, %5, %10 ve %15 oranlarında 50 µm boyutunda pomza malzemesiyle kaplamışlardır. Bu oranlarda pomza kaplaması yapılan kumaşların fiziksel ve UV özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kumaşlarda UPF değeri, güneş ışınlarının zararlı etkilerine karşı sağlanan koruma miktarını ifade eder. UPF değeri ne kadar yüksekse kumaşın UV ışınlarına karşı koruyuculuğu o kadar iyidir. Teknik tekstiller için UVA ve UVB ışınlarına yönelik ortalama geçirgenlik değerinin %2'den, koruyucu tekstiller için ise %5'ten düşük olması gerekmektedir. Kaplanmış kumaşların SEM/EDS analizleri, yırtılma mukavemeti, kumaş sertliği (bükülme uzunluğu) ve hava geçirgenliği değerleri değerlendirilmiştir. Mikronize pomza kaplama işlemi dokuma kumaşlara uygulandıktan sonra, kaplama yöntemi beklenen sonuçları vermiştir. Morfolojik analizler, eklenen pomzanın kumaş yüzeylerine başarılı şekilde bağlandığını doğrulamıştır. Pomzanın varlığı, kumaşların UV koruma özelliklerinde artışa neden olmuş; bu durum UPF değerindeki yükseliş ve UVA/UVB aralıklarındaki geçirgenliğin azalmasıyla ifade edilmiştir. %15 pomza ile kaplanan kumaşların UPF değerlerinin kontrol grubu kaplanmamış kumaşlara kıyasla pamuk kumaşta 5.08 kat, poliamid kumaşta 8.7 kat ve keten kumaşta 34.9 kat iyileştirdiğini belirtmişlerdir.

Beton gevrek bir malzemedir; bu zayıf yönü, farklı liflerin kullanılmasıyla giderilebilir.

Sarıkaya ve Susurluk 2023 yılında yapmış oldukları bir çalışmada, polipropilen, kapok ve hindistan cevizi lifleri içeren betonlar ile bunların kullanım alanlarının araştırılması, ayrıca beton karışımlarında çimento miktarı sabit tutularak farklı oranlarda kullanılan bu liflerin betonun fiziksel, mekanik ve termal özelliklerine etkilerinin incelenmesini amaçlamışlardır. Fiziksel ve mekanik özellikler ve ısı iletkenlik testleri için beton numune örnekleri hazırlamışlardır. Lif dozajındaki artışın, ısı iletkenlik değerini düşürerek ısı yalıtımına katkı sağlayacağını belirtmişlerdir.

Sarıkaya ve Yatkın, 2024 yılında yapmış oldukları bir çalışmada, hazırlanan akrilik/poliester lif karışımı harçların ısı yalıtımı özellikleri yanında basınç dayanımı, eğilme direnci gibi mekanik özelliklerini de ayrıntılı olarak

incelemiştir. Harç numunelerine %0, %0,5, %1, %1,5 oranlarında akrilik/poliester lif yapısı içerikli 8 farklı harç karışımı hazırlandığını belirtmiştir. Elde ettiği deneysel çalışma sonuçlarına göre, lif katkı oranı arttıkça basınç dayanımlarında düşüş olduğu, eğilme dirençlerinin ve yalıtım değerlerinin arttığını tespit etmişlerdir. Harçtaki karışımli lif içeriği arttıkça basınç dayanımının azaldığını ancak bu azalmanın bile standartlar içinde kaldığını belirtmişlerdir.

## SONUÇ:

Bu çalışmada, doğal ve gözenekli kayaçlar arasında yer alan mikronize edilmiş pomza, perlit ve zeolitin tekstil sektöründeki mevcut ve potansiyel kullanım alanları değerlendirilmiştir. Elde edilen literatür çalışmaları sonucunda, söz konusu kayaçların sahip oldukları fiziksel, kimyasal ve yapısal özellikler sayesinde tekstil endüstrisinin farklı süreçlerinde önemli katkılar sağlayabilecek nitelikte olduğunu göstermektedir. Gözenekli yapıları, yüksek yüzey alanları, düşük yoğunlukları, adsorpsiyon kapasiteleri ve çevresel açıdan sürdürülebilir özellikleri, bu kayaçları geleneksel sentetik malzemelere alternatif veya tamamlayıcı birer kaynak hâline getirmektedir.

Elde edilen bulgulara göre, Pomzanın özellikle aşındırıcı özelliklerinden yararlanılarak denim terbiye işlemlerinde yaygın şekilde kullanıldığı, bunun yanında hafiflik ve yalıtım özellikleri sayesinde teknik tekstiller açısından da potansiyel taşıdığı belirlenmiştir.

Perlitin düşük yoğunluğu, yüksek ısı yalıtımı kapasitesi ve kimyasal kararlılığı, fonksiyonel tekstil uygulamalarında değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Zeolit ise iyon değiştirme ve adsorpsiyon özellikleri sayesinde antibakteriyel, koku giderici, nem düzenleyici ve filtreleme amaçlı tekstil ürünlerinin geliştirilmesinde öne çıkmaktadır. Bu özellikler, tüketici beklentilerinin giderek arttığı günümüzde yüksek katma değerli ve fonksiyonel tekstil ürünlerinin üretimine katkı sunabilecek önemli avantajlar sağlamaktadır.

Yapılan araştırmalara göre, tekstil sektöründe sürdürülebilir üretim anlayışının yaygınlaşmasıyla birlikte doğal kaynaklı malzemelere olan ilginin arttığı görülmektedir. Bu bağlamda pomza, perlit ve zeolit gibi malzemelerin kullanımı, hem çevresel etkilerin azaltılmasına hem de üretim süreçlerinde kaynak verimliliğinin artırılmasına katkı sağlayabilir.

Özellikle atık su arıtımı, kimyasal tüketiminin azaltılması, enerji tasarrufu ve çevre dostu fonksiyonel tekstil ürünlerinin geliştirilmesi gibi alanlarda bu kayaçların sunduğu avantajlar dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, kullanım performanslarının proses koşullarına, mineral saflığına ve uygulama yöntemlerine bağlı olarak değişebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Sonuç olarak, incelenen literatürlerde deneysel bulgulara göre, pomza, perlit ve zeolitin tekstil endüstrisinde yalnızca geleneksel kullanım alanlarıyla sınırlı kalmadığı, aynı zamanda yenilikçi ve sürdürülebilir uygulamalar için önemli bir

potansiyel taşıdığı ortaya konulmuştur. Gelecekte yapılacak çalışmaların, bu kayaçların nano ve mikro ölçekli modifikasyonları, kompozit tekstil yapıları içerisindeki performansları ve endüstriyel ölçekte uygulanabilirlikleri üzerine yoğunlaşması, tekstil sektöründe daha verimli ve çevre dostu çözümlerin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Böylece doğal mineral kaynaklarının tekstil teknolojileri ile entegrasyonu, hem ekonomik hem de çevresel açıdan sürdürülebilir bir üretim modelinin oluşturulmasına destek verebilecektir.

## KAYNAKLAR

- 1.Akçalı, K., Bulut, M., O. (2022). Pomza, Amorf Silika ve Kolemanit Katkılı Baskı ve Sol Jel Yöntemi Kullanılarak Polyester Kumaşların Fiziksel Özelliklerinin Geliştirilmesi. Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi. 17 (2022) 384-403.
- 2.Akçalı, K., & Bulut, M., O. (2019). A new finishing process of cotton fabric. *Industria Textila*, 70(2), s101-110.
- 3.Bozkır, B. (2019). Zeolit ve Perlit Katkılı Nanokompozitlerin Hazırlanması ve Yüzey Özelliklerinin Belirlenmesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü yüksek lisans tezini s88.
- 4.Bozoğlu, A. (2010). Türkiye’de Çıkan Doğal Zeolitin Bebek Bezlerinde Antimikrobiyal Madde Olarak Kullanılması, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- 5.Gündüz, L., (2005), İnşaat Sektöründe Bimsblok, 928s.
6. Gong, T., Wang, X., Cao, Y. (2008). Application of Ag<sup>+</sup>-zeolite in the Antibacterial Finishing of Shoe Materials, CODEN: PKYGF6 ISSN: 1004-7964. Journal Written in Chinese. CAN 151:16362 AN 2009:212309 CAPLUS, 18(1), 44-47 pp.
- 7.Köse, H., Pamukçu, Ç., vd. (1997). Pomza ve Yapı Malzemesi Olarak Kullanım Olanakları, 2. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, s. 97-105, İzmir)
- 8.Nilanto, R. & Alimul, M. (2024). Sürdürülebilirlik açısından kot yıkama endüstrisinde pomza taşı ve eko-taşa genel bir bakış. *Tekstil Endüstrisi/Tekstilna Industrija*, 72 (2).
- 9.Öncü, G., & Şapcı, N. (2023). Protective properties of different fabrics using micronized pumice. *Indian Journal of Fibre & Textile Research (IJFTR)*, 48(3), 320-325.
- 10.Öncü, G. & Şapcı, N. (2025). Kompozit Malzeme ile Kaplanmış Kumaşların Koruyucu Tekstil Olarak Kullanımı Üzerine Teknik Bir Analiz. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 13(1), 17-27.)
- 11.Sarıkaya, H., Susurluk, G. (2023). Thermal And Mechanical Properties Of Concretes Containing Polypropylene, Kapok And Coconut Fibers, *Usak University Journal Of Engineering Sciences*, Volume: 6, Number: 1

- 12.Sarıkaya, H., ve Yatkın, M. (2024). Akrilik/Polyester Lif İlavesinin Harç Mekanik Ve Yalıtım Özelliklerine Etkisi, Bingöl Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi, Cilt:5, Sayı:2
13. Şapcı, N. & Öncü, G. (2025). Barrier Properties Against UV Radiation of Woven Fabrics Coated With Micronized Pumice, Fibers and Polymers, Volume 26, pages 675–683.
- 14.Tiber, B. (2011). Perlit İçeren Fonksiyonel Bir Tekstil Ürününün Tasarımı, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi. s246
- 15.Zhang, R. Yue, G., Shao, C., Wang, H., Xie, Y. (2004), Antibacterial Viscose Fiber Containing Silver-zeolite Antibacterial Agent and its Production, CODEN: CNXXEV CN1779004 A 20060531 Patent Written in Chinese. Application: CN 2004 10060290 20041126.Priority:CAN 2006:530678 CAPLUS16.<https://www.mta.gov.tr/>



## *BÖLÜM 10*



# İş Sağlığı ve Güvenliği ve Tehlikeli Madde Güvenlik Danışmanlığı Sektöründe Yapay Zekâ Entegrasyonu

*Arda Yılmaz<sup>1</sup>*

## 1. Giriş

İş sağlığı ve güvenliği ile tehlikeli madde güvenlik danışmanlığı, kağıt üzerinde yönetilemeyecek kadar canlı ve sahada tesadüfe bırakılamayacak kadar kritik iki alandır. İSG; çalışanların sağlığını, güvenliğini ve çalışma ortamının iyileştirilmesini hedeflerken, TMGD; tehlikeli maddelerin karayolu, denizyolu ve demiryolu taşımacılığı süreçlerinde insan sağlığına, canlı varlıklara ve çevreye zarar vermeden yönetilmesini amaçlar. Bu iki alanın ortak zemini riskin erken görülmesi, uygunsuzluğun doğru tanımlanması, alınacak önlemin somutlaştırılması ve tüm sürecin izlenebilir biçimde belgelendirilmesidir. Geleneksel uygulamada İSG ve TMGD profesyonelleri; saha kontrolleri, eğitim kayıtları, risk değerlendirmeleri, acil durum planları, periyodik kontrol takibi, ramak kala bildirimleri, kimyasal envanterler, güvenlik bilgi formları, ADR yazılı talimatları, taşıma evrakları ve yıllık faaliyet raporları gibi yoğun bir dokümantasyon yüküyle karşı karşıyadır. Bu yükün bir kısmı doğrudan uzmanlık ister; bir kısmı ise tekrar eden, veri derleme ağırlıklı, zaman tüketen ve hata üretmeye açık idari işlemlerden oluşur. Yapay zekânın sektöre girişi tam da bu gri bölgede anlam kazanır.

Uluslararası çalışma yaşamında yapay zekâ, robotik, dijitalleşme ve otomasyonun iş sağlığı ve güvenliği üzerindeki etkileri giderek daha fazla tartışılmaktadır. ILO, 2025 tarihli çalışmasında yapay zekâ ve dijitalleşmenin işyerlerinde hem yeni koruyucu araçlar sunduğunu hem de psikososyal riskler, gözetim, algoritmik baskı ve veri güvenliği gibi yeni risk başlıkları doğurduğunu vurgulamaktadır (International Labour Organization [ILO], 2025). EU-OSHA da dijital çağda güvenli ve sağlıklı çalışma kampanyası kapsamında yapay zekâ ile çalışan yönetimi, akıllı dijital sistemler, otomasyon ve platform çalışmasını ayrı risk kümeleri olarak ele almaktadır (European Agency for Safety and Health at Work [EU-OSHA], 2025). Türkiye açısından 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu, işverenin çalışanların işle ilgili sağlık ve güvenliğini sağlama yükümlülüğünü temel eksen olarak kurar. Bu yükümlülük, yapay zekâ kullanılsa

<sup>1</sup> A İGU/TMGD, Serbest Danışman, ORCID: 0000-0002-0950-5502

da ortadan kalkmaz; aksine kullanılan teknolojinin seçimi, doğrulanması ve insan denetimi altında uygulanması bakımından yeni bir sorumluluk katmanı oluşturur (6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu, 2012). TMGD alanında ise ADR 2025 ve Tehlikeli Madde Güvenlik Danışmanlığı Hizmetleri Hakkında Yönetmelik, tehlikeli madde süreçlerinde sınıflandırma, ambalajlama, işaretleme, yükleme, taşıma, boşaltma, eğitim ve raporlama gibi başlıklarda düzenli ve izlenebilir bir sistem kurulmasını gerektirir (United Nations Economic Commission for Europe [UNECE], 2024; Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2022).

## **2. Kavramsal Çerçeve: Yapay Zekâ Ne İşe Yarar, Ne İşe Yaramaz?**

Yapay zekâ, en sade anlatımla büyük miktarda veriden örüntü çıkarabilen, metin, görüntü, ses veya sayısal veri üzerinde tahmin, sınıflandırma, özetleme ve öneri üretme gibi işlemler yapabilen sistemler ailesidir. İSG ve TMGD açısından yapay zekâ; bir defter tutucudan daha fazlası, bir uzman yerine geçecek sihirli sandıktan ise daha azıdır. Bu ayrımı doğru kurmak gerekir. Sektörün ihtiyacı, sorumluluğu buluta atan bir otomasyon değil; uzmanı gereksiz ayrıntı bataklığından çıkarıp kritik karar alanına taşıyan bir yardımcı kaptandır. Yapay zekâ üç düzeyde düşünülebilir. Birinci düzey, dokümantasyon ve idari destek düzeyidir: toplantı tutanaklarının özetlenmesi, eğitim planlarının hazırlanması, mevzuat kontrol listelerinin oluşturulması, saha fotoğraflarından tespit taslaklarının çıkarılması ve rapor formatlarının standartlaştırılması buna girer. İkinci düzey, analitik destek düzeyidir: ramak kala kayıtlarından eğilim analizi yapılması, bakım gecikmelerinin kaza olasılığıyla ilişkilendirilmesi, kimyasal envanterden uyumsuz depolama ihtimallerinin belirlenmesi, taşıma süreçlerinde sık tekrar eden uygunsuzlukların haritalanması bu düzeye örnektir. Üçüncü düzey ise karar destek düzeyidir: risk puanlamasına yardımcı olan modeller, önceliklendirme algoritmaları, dinamik kontrol planları ve erken uyarı sistemleri bu sınıfta yer alır. Ancak yapay zekânın sınırı nettir. Yapay zekâ sahada kokuyu alamaz, çalışan davranışındaki tereddüdü insan gibi okuyamaz, üretim baskısının ekip üzerinde yarattığı görünmez yorgunluğu tek başına hissedemez. Modelin verdiği sonuç; veri kalitesi, eğitildiği bağlam, sistemin tasarımı ve kullanıcı talimatının doğruluğu kadar güvenilirdir. Bu nedenle yapay zekâ çıktısı, İSG profesyoneli veya TMGD tarafından kontrol edilmeden nihai karar haline getirilmemelidir. Mesleki imza, yapay zekânın değil insanın sorumluluğudur. Bu çerçevede yapay zekâ için en doğru yaklaşım, 'insan merkezli karar destek' yaklaşımıdır. OECD yapay zekâ ilkeleri, güvenilir yapay zekâ sistemlerinin insan haklarına, demokratik değerlere, şeffaflığa, hesap verebilirliğe, güvenliğe ve sağlamlığa dayanması gerektiğini belirtir (Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD], 2024). ISO/IEC 42001:2023 ise kuruluşların yapay zekâ yönetim sistemi kurarak politika, hedef, risk, sorumluluk, izleme ve iyileştirme süreçlerini sistematik biçimde yönetmesini öngörür (International Organization for Standardization [ISO], 2023).

### **3. İSG Sektöründe Yapay Zekânın Kullanım Alanları**

#### **3.1. Risk Değerlendirmesi ve Dinamik Risk Haritalama**

Klasik risk değerlendirmesi çoğu işletmede belirli aralıklarla güncellenen, tablo mantığına dayalı ve çoğu zaman saha gerçekliğinin gerisinden gelen bir dokümandır. Oysa işyerinde risk sabit değildir; vardiya düzeni, üretim hacmi, bakım durumu, çalışan tecrübesi, hava koşulları, alt işveren yoğunluğu, makine arızaları ve malzeme değişimleriyle birlikte değişir. Yapay zekâ, risk değerlendirmesini statik bir evrak olmaktan çıkarıp yaşayan bir risk haritasına dönüştürme potansiyeli taşır. Örneğin bir üretim tesisinde ramak kala bildirimleri, kaza kayıtları, bakım formları, eğitim katılım kayıtları, uygunsuzluk raporları ve periyodik kontrol sonuçları bir veri havuzunda birleştirildiğinde, yapay zekâ belirli bölümlerde tekrar eden risk örüntülerini gösterebilir. Bir bölümde el yaralanmaları artıyorsa, aynı dönemde eldiven kullanımında düşüş, yeni personel oranında artış veya bakım gecikmesi olup olmadığı araştırılabilir. Böylece risk değerlendirmesi yalnızca 'tehlike var mı?' sorusunu değil, 'bu tehlike neden şu anda daha kritik hale geldi?' sorusunu da yanıtlamaya yaklaşır. 5x5 matris, Fine-Kinney veya L tipi matris gibi yöntemler yapay zekâ ile daha tutarlı hale getirilebilir. Model, önceki risk puanlarını, benzer faaliyetleri ve kontrol tedbirlerinin etkinliğini karşılaştırarak uzmana tutarsızlık uyarısı verebilir. Ancak nihai puanlama mekanik biçimde modele bırakılmamalıdır. Çünkü risk puanı yalnızca sayısal bir işlem değil; hukuki, teknik, operasyonel ve insani boyutu olan bir mesleki değerlendirmedir. Yapay zekâ burada hakem değil, ikinci göz olmalıdır.

#### **3.2. Saha Gözetimi, Fotoğraf Analizi ve Uygunsuzluk Tespiti**

Saha gözetiminde yapay zekânın en pratik kullanım alanlarından biri fotoğraf ve video analizidir. Şantiye, depo, üretim hattı, kimyasal depolama alanı veya bakım atölyesi görselleri üzerinden düşme riski, uygunsuz istifleme, eksik korkuluk, uygunsuz merdiven kullanımı, KKD eksikliği, yangın tüpü erişim engeli, acil çıkış önü kapanması, etiketsiz kimyasal kapları veya zemin düzensizlikleri ön tespit olarak çıkarılabilir. Bu tür sistemler, özellikle çok sayıda fotoğrafın incelendiği saha raporlarında ciddi zaman kazancı sağlar.

Bununla birlikte görsel yapay zekâ iki nedenle dikkatli kullanılmalıdır. Birincisi, sistem yalnızca görüntüde seçebildiğini yorumlar; görüntünün dışında kalan tehlikeyi göremez. İkincisi, bazı uygunsuzluklar bağlam bilgisi olmadan anlaşılamaz. Örneğin bir malzemenin geçici olarak bırakıldığı alan mı yoksa sürekli depolama alanı mı olduğu, iş izni kapsamında kontrollü çalışma mı yapıldığı, bir ekipmanın enerjisinin kesilip kesilmediği fotoğraftan kesin olarak anlaşılamayabilir. Bu yüzden yapay zekâ raporu 'nihai tespit' değil, 'uzman incelemesine esas ön tespit' olarak değerlendirilmelidir. İyi tasarlanmış bir saha yapay zekâ sistemi, fotoğrafı yalnızca yorumlamakla kalmaz; tespit, risk, muhtemel sonuç, alınması gereken önlem, sorumlu birim, termin tarihi ve

mevzuat dayanağı için taslak satır da üretir. Böylece uzman, sıfırdan metin yazmak yerine doğru tespiti doğrular, yanlışları temizler ve işletmeye özgü önlemi güçlendirir. Bu, rapor kalitesini artırırken saha gözleminin standartlaşmasına da katkı sunar.

### **3.3. Eğitim, Davranışsal Güvenlik ve Mikro Öğrenme**

İSG eğitimleri çoğu işyerinde mevzuat gereği yapılan, katılım formu alınan ve zamanla rutine dönüşen faaliyetler haline gelebilmektedir. Yapay zekâ bu alanı kişiselleştirilmiş öğrenme yönünde değiştirebilir. Çalışanın görevi, tecrübesi, maruziyet profili, daha önceki sınav sonuçları, ramak kala bildirimleri ve bölüm riskleri analiz edilerek daha hedefli eğitim içerikleri hazırlanabilir. Örneğin forklift operatörü için kör nokta, yük dengesi ve yaya yolu modülleri; kimyasal depo çalışanı için SDS okuma, uyumsuz kimyasal ayrımı ve dökülme müdahalesi modülleri öne çıkarılabilir. Yapay zekâ destekli eğitim sistemleri, uzun ve genel sunumlar yerine kısa mikro öğrenme içerikleri üretebilir. Beş dakikalık toolbox konuşmaları, vardiya başlangıcı uyarıları, bölüm bazlı mini sınavlar, görsel örnekli uyarı kartları ve çalışanların anlayacağı sade dilde güvenli çalışma talimatları hazırlanabilir. Özellikle yüksek riskli işlerde tekrarın değeri büyüktür; doğru zamanda gelen kısa bir hatırlatma, kalın klasörlerde uyuyan talimattan daha etkilidir. Ancak eğitimde yapay zekâ kullanımı, çalışanı sürekli ölçen ve baskılayan bir performans takip aracına dönüşmemelidir. EU-OSHA'nın yapay zekâ ile çalışan yönetimi konusundaki uyarıları, dijital sistemlerin şeffaflık, katılım, insan denetimi ve psikososyal etkiler açısından dikkatle ele alınması gerektiğini göstermektedir (EU-OSHA, 2025). Eğitim amaçlı veri, disiplin mekanizmasına dönüştüğünde öğrenme iklimi bozulur. Güvenlik kültürü, korkuyla değil güvenle büyür.

### **3.4. Acil Durum Yönetimi ve Erken Uyarı**

Acil durum yönetiminde yapay zekâ, sensör verileri, bakım kayıtları, ortam ölçümleri, meteorolojik bilgiler, yangın algılama sistemleri ve çalışan konum bilgileri ile entegre edildiğinde erken uyarı kapasitesi sağlayabilir. Patlayıcı ortam oluşma ihtimali, gaz kaçağı, sıcaklık artışı, duman algısı, tehlikeli kimyasal dökülmesi veya yoğun insan hareketi gibi değişkenler gerçek zamanlı izlenebilir. Bu sistemler, özellikle kimyasal tesisler, depolar, akaryakıt tesisleri, boya/vernük alanları ve büyük şantiyelerde değerli olabilir. Bununla birlikte acil durum sistemlerinde yapay zekâya aşırı güvenmek tehlikelidir. Sensör arızası, yanlış kalibrasyon, ağ kesintisi, enerji kaybı veya hatalı alarm eşik değerleri sistemi körleştirebilir. Bu nedenle yapay zekâ destekli acil durum yönetimi; klasik tahliye planı, tatbikat, ekip eğitimi, manuel alarm sistemi, yangın söndürme ekipmanı, acil aydınlatma, yönlendirme levhaları ve toplanma alanı düzeniyle birlikte düşünülmelidir. Teknoloji, acil durum organizasyonunun yerine geçmez; onu hızlandıran sinir sistemi gibi çalışır.

## **4. TMGD Sektöründe Yapay Zekânın Kullanım Alanları**

### **4.1. ADR Uygunluk Kontrolleri ve Sınıflandırma Desteği**

TMGD alanı, yapay zekâ için çok uygun ama aynı zamanda çok hassas bir uygulama sahasıdır. Çünkü tehlikeli madde taşımacılığında hatalı sınıflandırma, yanlış ambalaj grubu, eksik etiketleme, uygunsuz taşıma evrakı veya hatalı yazılı talimat yalnızca idari yaptırım değil, ciddi kaza ve çevre zararı doğurabilir. ADR 2025, 1 Ocak 2025'ten itibaren uygulanacak metin olarak sınıflandırma, paketlenme, işaretleme, taşıma, ekipman, eğitim ve güvenlik hükümleri bakımından temel uluslararası çerçeveyi sunmaktadır (UNECE, 2024). Yapay zekâ, UN numarası, uygun taşıma adı, sınıf, ambalaj grubu, tünel kısıtlama kodu, sınırlı miktar, muafiyet rejimi, karma yükleme kısıtları ve taşıma evrakı unsurlarını kontrol eden bir karar destek aracı olarak kullanılabilir. Örneğin kullanıcı kimyasal adını, SDS bilgilerini veya UN numarasını girdiğinde sistem ADR tablosuyla karşılaştırma yaparak eksik veya çelişkili alanları işaretleyebilir. Ancak sınıflandırma gibi kritik konularda modelin önerisi doğrudan kabul edilmemelidir; ADR metni, güvenlik bilgi formu, üretici bilgisi ve TMGD mesleki değerlendirmesi birlikte kullanılmalıdır. Bu alanda yapay zekânın en büyük katkısı, insanın gözünden kaçabilecek tutarsızlıkları yakalamasıdır. Bir SDS'de parlama noktası düşük olan bir ürünün yanlış depolama alanında bulunması, taşıma evrakında UN numarası ile uygun taşıma adının uyuşmaması, ambalaj üzerindeki etiket ile sevk evrakının farklı sınıf göstermesi veya işletmenin yıllık faaliyet raporundaki miktarlarla sevkiyat kayıtlarının uyumsuz olması otomatik olarak işaretlenebilir. Bu, TMGD'nin saha ve sistem kontrolünü daha keskin hale getirir.

### **4.2. Kimyasal Envanter, SDS ve Uyumsuz Depolama Analizi**

Kimyasal envanter yönetimi TMGD ve İSG'nin kesişim alanıdır. İşyerinde kullanılan kimyasalların güvenlik bilgi formları, etiketleri, depolama koşulları, miktarları, maruziyet riskleri, yangın sınıfları ve atık süreçleri birlikte değerlendirilmelidir. Yapay zekâ, SDS dokümanlarını okuyarak tehlike ifadeleri, önlem ifadeleri, piktogramlar, parlama noktası, toksisite, çevresel tehlike, kişisel koruyucu donanım ve dökülme müdahalesi bilgilerini özetleyebilir. Bu özetler, kimyasal risk değerlendirmesi ve çalışan eğitimleri için hızlı başlangıç sağlar. Uyumsuz depolama analizi, yapay zekânın yüksek değer üretebileceği bir başka alandır. Asitler, bazlar, oksitleyiciler, yanıcı sıvılar, toksik maddeler, gaz tüpleri ve çevre için tehlikeli maddeler belirli ayırım kurallarıyla depolanmalıdır. Envanter tablosu ile depo yerleşim planı eşleştirildiğinde sistem, aynı rafta veya yakın bölgede bulunmaması gereken maddeleri işaretleyebilir. Bu analiz, özellikle depo büyüdükçe ve ürün çeşidi arttıkça altın değerindedir; çünkü kimyasal depo hataları sessiz görünür, ama sonuçları gürültülü olur. Yapay zekâ ayrıca SDS güncelliğini takip edebilir. Tedarikçiden gelen yeni formun tarihini, önceki versiyondaki değişiklikleri ve işyerindeki talimatlara etkisini

karşılaştırılabilir. Böylece kimyasal envanter, unutulmuş klasör değil yaşayan bir yönetim sistemi haline gelir. TMGD ve iş güvenliği uzmanı, bu çıktıları kullanarak eğitimleri, depolama talimatlarını, dökülme kitlerini, yangın ekipmanını ve kişisel koruyucu donanım listesini güncelleyebilir.

### **4.3. TMGD Faaliyet Raporları, İç Tetkik ve Yıllık Değerlendirme**

TMGD hizmetlerinde raporlama, danışmanlığın görünür yüzüdür. Aylık faaliyetler, saha tespitleri, eğitimler, mevzuat kontrolleri, taşıma evrakı incelemeleri, kaza/olay kayıtları, uygunsuzluklar, düzeltici faaliyetler ve yıllık değerlendirmeler sistematik olarak kaydedilmelidir. Yapay zekâ, farklı kaynaklardan gelen bu verileri birleştirerek aylık veya yıllık faaliyet raporu taslağı oluşturabilir. Ancak bu taslak, TMGD'nin fiili gözlemini ve mesleki kanaatini ikame etmemelidir. İyi bir TMGD yapay zekâ modülü; işletmenin taraf rollerini, taşıma modlarını, işlem gördüğü tehlikeli madde sınıflarını, miktarlarını, eğitim durumunu, araç/ekipman kontrollerini, yazılı talimat durumunu, güvenlik planı ihtiyacını ve önceki uygunsuzlukların kapanma durumunu birlikte izler. Sistem, 'bu ay hangi uygunsuzluklar tekrar etti?', 'hangi bölümde eğitim eksiği var?', 'hangi kimyasal sınıfında miktar artışı oldu?', 'hangi taşıma evrakında tekrar eden hata var?' gibi sorulara hızlı yanıt verir. İç tetkik açısından yapay zekâ, kontrol listelerini işletmeye göre özelleştirebilir. Örneğin gönderici, yükleyen, dolduran, paketleyen, boşaltan ve taşımacı rollerine göre ayrı kontrol soruları üretebilir. Bu sayede TMGD'nin inceleme yaklaşımı daha hedefli olur. Ancak mevzuat yorumunda son söz yine yetkin danışmana aittir. Yapay zekâ, mevzuat metnini tarayabilir; ama işletmenin fiili faaliyetiyle mevzuat gereğini bağdaştırmak insan uzmanlığının işidir.

### **5. Entegrasyon Modeli: Sahadan Dokümana, Dokümandan Karara**

Yapay zekâ entegrasyonu tek hamlede yapılacak bir yazılım satın alma işi değildir. İSG ve TMGD sektöründe başarılı entegrasyon, aşamalı ve kontrollü bir yönetim modeline ihtiyaç duyar. Bu model; veri hazırlığı, kullanım alanı seçimi, pilot uygulama, insan denetimi, etik ve hukuki kontrol, performans ölçümü ve sürekli iyileştirme adımlarından oluşmalıdır.

Tablo 1

| Aşama                  | Amaç                                             | Uygulama Örneği                                                            | Kontrol Noktası                             |
|------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 1. Veri envanteri      | Mevcut doküman ve kayıtların haritalanması       | Risk analizleri, ramak kala kayıtları, SDS, eğitim formları, ADR evrakları | Veri güncelliği, doğruluk ve yetki kontrolü |
| 2. Pilot alan seçimi   | Düşük riskli ama faydası yüksek süreçle başlamak | Saha raporu taslağı, eğitim içerik üretimi, SDS özetleme                   | Çıktılar uzman tarafından onaylanmalı       |
| 3. İnsan denetimi      | Model önerisini mesleki karara dönüştürmek       | Risk puanı önerisi, uygunsuzluk sınıflandırması                            | Nihai karar ve imza insanda kalmalı         |
| 4. Mevzuat uyumu       | Hukuki çerçeveye çelişmemek                      | 6331, ADR, TMGD yönetmeliği, KVKK uyumu                                    | Sorumluluk teknolojiye devredilmemeli       |
| 5. Performans ölçümü   | Gerçek faydayı görmek                            | Rapor süresi, uygunsuzluk kapanma oranı, eğitim etkinliği                  | Sadece hız değil kalite de ölçülmeli        |
| 6. Sürekli iyileştirme | Sistemi sahadan beslemek                         | Yanlış önerilerin modele geri bildirilmesi                                 | Hata kayıtları düzenli analiz edilmeli      |

Bu modelin ilk adımı veri envanteridir. İşletmenin hangi verileri tuttuğu, bu verilerin nerede saklandığı, kimlerin erişebildiği, ne kadar güncel olduğu ve hangi formatta bulunduğu belirlenmeden yapay zekâ entegrasyonu sağlıklı kurulamaz. Dağınık veri, yapay zekâ için bulanık cam demektir; cam ne kadar kirliyse manzara o kadar yanlış görünür. İkinci adım pilot uygulamadır. Bir işletme ilk günden tüm İSG ve TMGD süreçlerini yapay zekâyâ bağlamaya çalışırsa sistem hem çalışanlarda direnç oluşturur hem de yönetilmesi güç riskler doğurur. Daha doğru yaklaşım, önce saha raporu taslağı üretimi, eğitim içeriklerinin kişiselleştirilmesi, SDS özetleme veya periyodik kontrol takibi gibi sınırlı ve doğrulanabilir alanlarda pilot yapmaktır. Pilotun amacı yalnızca yazılımı denemek değil, insan-sistem işbirliğini test etmektir. Üçüncü adım insan denetimidir. Yapay zekâ çıktıları 'kontrol edilmeden kullanılmaz' prensibiyle yönetilmelidir. Özellikle risk değerlendirmesi, TMGD uygunluk görüşü, acil durum kararları, çalışan sağlığı verileri ve yaptırıma konu olabilecek raporlar için uzman onayı zorunlu olmalıdır. Bu noktada kuruluşlar 'yapay zekâ kullanım prosedürü' hazırlamalı; hangi işlerde kullanılabileceğini, hangi işlerde kullanılamayacağını, onay mekanizmasını, veri gizliliğini ve hata bildirim yöntemini yazılı hale getirmelidir. Dördüncü adım performans ölçümüdür. Yapay zekâ kullanıldı diye sistem otomatik olarak daha iyi hale gelmez. Rapor hazırlama süresi azaldı mı, uygunsuzluk kapanma oranı arttı mı, tekrar eden kazalar azaldı mı, eğitim sınav başarıları yükseldi mi, tehlikeli madde evrak hataları düştü mü, çalışan memnuniyeti ve psikososyal riskler nasıl etkilendi? Bu sorulara yanıt verilmiyorsa teknoloji sahada ışıklı oyuncak olarak kalır.

## 6. Dokümantasyonda Yapay Zekâ: Klasör Değil, Karar Hafızası

İSG ve TMGD sektörlerinde dokümantasyon çoğu zaman bir yük gibi görülür. Oysa doğru dokümantasyon, kurumun hafızasıdır. Kaza olduğunda, denetim geldiğinde, mahkeme süreci başladığında veya yönetim değiştiğinde işletmeyi ayakta tutan şeylerden biri izlenebilir kayıttır. Yapay zekâ bu hafızayı düzenleyebilir, hızlandırabilir ve daha okunabilir hale getirebilir. İSG dokümantasyonunda yapay zekâ; risk değerlendirmesi taslakları, güvenli çalışma talimatları, toolbox eğitim metinleri, acil durum senaryoları, saha tespit raporları, kurul gündemleri, düzeltici faaliyet takip tabloları ve periyodik kontrol eksik listeleri oluşturabilir. TMGD dokümantasyonunda ise ADR yazılı talimat teslim tutanakları, tehlikeli madde faaliyet planları, eğitim kayıtları, taraf yükümlülük prosedürleri, taşıma evrakı kontrol listeleri, güvenlik planı değerlendirmeleri ve yıllık faaliyet raporu taslakları hazırlanabilir. Fakat dokümantasyonda yapay zekâ kullanımının altın kuralı şudur: Metin doğru görünse bile doğru olmayabilir. Yapay zekâ akıcı cümle kurabilir, ancak mevzuat atfını yanlış verebilir, olmayan bir madde numarasını uydurabilir, işletmenin gerçekte sahip olmadığı önlemleri varmış gibi yazabilir. Bu nedenle her yapay zekâ destekli dokümanda uzman kontrolü, mevzuat doğrulaması ve saha gerçekliği kontrolü yapılmalıdır. Raporun güzel görünmesi yetmez; raporun gerçeğe sadık olması gerekir.

Dokümantasyon otomasyonunda en değerli kullanım biçimi şablon yönetimidir. İşletmeler, kendi onaylı formatlarını yapay zekâ sistemine tanımlayabilir. Böylece her rapor aynı başlık düzeni, aynı tablo yapısı, aynı terminoloji ve aynı sorumluluk diliyle hazırlanır. Özellikle İSG'de 'iş güvenliği uzmanı denetim yapar' gibi hukuki açıdan sakıncalı ifadeler yerine 'saha gözetimi, rehberlik ve danışmanlık faaliyeti' gibi doğru ifadeler kullanılabilir. TMGD'de de danışmanın yükümlülükleri, işletme sorumluluğunu ortadan kaldırmayacak biçimde yazılmalıdır.

## 7. Hukuki, Etik ve Psikososyal Riskler

Yapay zekâ entegrasyonunda asıl mesele yalnızca ne yapılabileceği değil, neyin yapılmaması gerektiğidir. İşyerlerinde yapay zekâ destekli kamera analizi, giyilebilir sensörler, konum takibi, verimlilik ölçümü ve davranış analizi sistemleri çalışan mahremiyeti açısından hassas sonuçlar doğurabilir. Bu sistemler koruma amacıyla kurulsa bile yanlış tasarlanırsa çalışan üzerinde sürekli izlenme baskısı yaratabilir. İSG'nin amacı insanı korumaktır; insanı veri noktasına indirgemek değildir. Avrupa Birliği Yapay Zekâ Tüzüğü, yapay zekâ sistemlerini risk temelli bir yaklaşımla ele almakta ve istihdam, çalışan yönetimi, kritik altyapı gibi alanlarda yüksek riskli kullanımlara özel yükümlülükler getirmektedir (European Union, 2024). Bu yaklaşım, Türkiye'deki işletmeler için de yol göstericidir. Özellikle işe alım, performans değerlendirme, disiplin, vardiya planlama veya çalışan davranış izleme gibi alanlarda yapay zekâ kullanımı, şeffaflık ve insan denetimi olmadan uygulanmamalıdır. İSG ve TMGD



alanlarında veri güvenliği de kritik başlıktır. Sağlık gözetimi verileri, kaza kayıtları, çalışan kimlik bilgileri, eğitim kayıtları, kimyasal envanterler, tesis yerleşim planları ve tehlikeli madde süreçleri hassas bilgilerdir. Bu verilerin kontrolsüz biçimde dış yapay zekâ araçlarına yüklenmesi hem kişisel verilerin korunması hem ticari sırlar hem de güvenlik açısından sorun yaratabilir. İşletmeler, hangi verinin hangi araçta kullanılabileceğini, anonimleştirme yöntemlerini ve erişim yetkilerini belirlemelidir. Etik açıdan bir diğer risk, yapay zekânın sorumluluk perdesi olarak kullanılmasıdır. Bir uygunsuzluk olduğunda 'sistem böyle söyledi' savunması kabul edilebilir değildir. 6331 sayılı Kanun'un işveren sorumluluğu yaklaşımı, teknolojik araçların kullanılmasını sorumluluktan kaçış gerekçesi haline getirmez. Aynı şekilde TMGD süreçlerinde danışmanın önerileri ve işletmenin uygulama yükümlülüğü, yazılım çıktısıyla ortadan kalkmaz. Yapay zekâ, mesleki aklın yanında durmalı; onun arkasına saklanılacak bir gölge olmamalıdır.

## 8. Saha Senaryoları: Yapay Zekânın Somut Kullanım Örnekleri

Tablo 2

| Senaryo               | Yapay Zekâ Kullanımı                                                  | Beklenen Fayda                                               | Dikkat Edilecek Sınır                           |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Şantiye saha gözetimi | Fotoğraflardan korkuluk, açıklık, iskele, KKD ve düzen tespit taslağı | Hızlı raporlama ve standart tespit dili                      | Fotoğraf bağlamı uzman tarafından doğrulanmalı  |
| Kimyasal depo         | SDS özetleme, uyumsuz depolama ve etiket kontrolü                     | Yangın, reaksiyon ve maruziyet riskinin görünür hale gelmesi | SDS ve ADR tablosu elle doğrulanmalı            |
| TMGD evrak kontrolü   | UN numarası, uygun taşıma adı, sınıf ve evrak alanı kontrolü          | Evrak hatalarının azalması                                   | Nihai uygunluk kararı TMGD tarafından verilmeli |
| Ramak kala analizi    | Bildirimlerden tekrar eden kök nedenleri çıkarma                      | Önleyici faaliyetlerin hedeflenmesi                          | Eksik bildirim kültürü sonuçları yanılabilir    |
| Eğitim planlama       | Görev ve risk bazlı mikro eğitim içerikleri                           | Eğitimin işe uygun hale gelmesi                              | Eğitim verisi disiplin baskısına dönmemeli      |
| Acil durum            | Sensör ve bildirim verisiyle erken uyarı                              | Müdahale süresinin kısalması                                 | Manuel sistem ve tatbikat ihmal edilmemeli      |

Bu senaryoların ortak noktası, yapay zekânın uzmanı hızlandırmasıdır. Yapay zekâ, sahada daha fazla noktaya bakmayı, daha çok veriyi ilişkilendirmeyi ve raporu daha kısa sürede olgunlaştırmayı sağlar. Ancak hiçbir senaryoda yapay zekâ tek başına nihai otorite değildir. Çünkü İSG ve TMGD kararları, çoğu zaman eksik bilgiyle, saha baskısıyla ve mevzuatın yoruma açık alanlarıyla birlikte verilir. Bu karmaşık alanlarda insan muhakemesi vazgeçilmezdir.

## 9. Kurumsal Yol Haritası: İSG-TMGD Yapay Zekâ Programı Nasıl Kurulur?

Bir işletme veya danışmanlık kuruluşu, İSG ve TMGD süreçlerinde yapay zekâdan yararlanmak istiyorsa bunu proje mantığıyla değil, yönetim sistemi mantığıyla ele almalıdır. ISO/IEC 42001:2023'ün yapay zekâ yönetim sistemi yaklaşımı bu noktada güçlü bir çerçeve sunar. Kuruluş önce yapay zekâ politikasını belirlemeli, ardından riskleri, sorumlulukları, veri kaynaklarını, onay mekanizmalarını ve izleme göstergelerini tanımlamalıdır (ISO, 2023). Yol haritasının ilk adımı 'kullanım envanteri'dir. Kuruluş hangi yapay zekâ araçlarını kullanıyor, hangi çalışanlar hangi verileri bu araçlara giriyor, hangi çıktılar raporlara yansıyor, hangi kararlar otomatikleşiyor? Bu sorular yanıtlanmadan kurumsal kontrol kurulamaz. Birçok işletmede en büyük risk, yönetimin bilmediği gölge yapay zekâ kullanımıdır. Çalışanlar hız kazanmak için hassas verileri dış araçlara yükleyebilir; bu durum fark edilmezse veri güvenliği zedelenir. İkinci adım 'kırmızı çizgiler'in belirlenmesidir. Sağlık verileri, kişisel veriler, disiplin kararları, işe alım/çıkarma kararları, kaza kusur değerlendirmesi, kritik ADR sınıflandırması ve resmi beyan niteliğindeki metinler doğrudan otomatik karar alanına bırakılmamalıdır. Bu alanlarda yapay zekâ yalnızca taslak, özet, kontrol listesi veya uyarı üretebilir; nihai karar yetkin insan tarafından verilmelidir. Üçüncü adım eğitimidir. Yapay zekâ aracı kullanan İSG profesyonelleri, TMGD'ler, insan kaynakları, operasyon yöneticileri ve saha amirleri; model yanlılığı, veri gizliliği, doğru talimat yazma, çıktı doğrulama ve etik kullanım konularında eğitilmelidir. Yapay zekâ cahilliği, yeni dönemin görünmez iş kazasıdır; fark edilmez ama zincirleme hata üretir. Dördüncü adım denetim ve kayıt sistemidir. Yapay zekâ ile üretilen her kritik dokümanda hangi aracın kullanıldığı, hangi verinin girildiği, çıktının kim tarafından kontrol edildiği ve hangi revizyonların yapıldığı izlenebilmelidir. Bu kayıt, hem kalite yönetimi hem de olası denetim ve uyuşmazlıklarda önem taşır.

## 10. İSG ve TMGD Profesyonellerinin Gelecekteki Yetkinlikleri

Yapay zekâ, İSG uzmanı ve TMGD'nin mesleki profilini dönüştürecek. Geleceğin uzmanı yalnızca mevzuat bilen kişi olmayacak; veriyi okuyabilen, dijital araçları sorgulayabilen, yanlış çıktıyı ayıklayabilen, etik sınırı koruyabilen ve saha gerçekliğini algoritmik öneriyle dengeleyebilen profesyonel olacaktır. Bu yeni profil, 'teknolojiyi kullanan uzman' değil, 'teknolojiyi yöneten uzman' profilidir. İSG profesyonelleri için veri okuryazarlığı önem kazanacaktır. Kaza frekans oranı, ramak kala eğilimi, eğitim etkinliği, kontrol tedbiri kapanma süresi, bölüm bazlı risk yoğunluğu ve periyodik kontrol gecikmeleri gibi göstergeler daha analitik biçimde yorumlanacaktır. TMGD'ler için ise ADR verisi, kimyasal envanter, taşıma miktarları, taraf yükümlülükleri, güvenlik planı gereklilikleri ve evrak doğrulama süreçleri dijital sistemlerle daha yakın ilişkili hale gelecektir. Bu dönüşüm bazı işleri azaltacak, bazı işleri ise derinleştirecektir. Örneğin

standart eğitim formu hazırlamak, basit rapor taslağı üretmek veya SDS özetlemek daha hızlı hale gelecektir. Buna karşılık çıktı doğrulama, etik değerlendirme, veri güvenliği, sistem denetimi, saha-veri uyumu ve karar sorumluluğu daha önemli hale gelecektir. Yani meslek yok olmayacak; kabuk değiştirecektir. Tırtıl dosya taşıyordu, kelebek veri okuyacak; ama uçuş planını yine insan yapacak. Danışmanlık sektöründe rekabet de değişecektir. Sadece hazır şablon satan danışmanlık modeli zayıflayacak; veri temelli, raporlanabilir, ölçülebilir ve işletmeye özgü çözüm üreten danışmanlık değer kazanacaktır. İyi uzman, yapay zekâdan korkan değil, onu işveren sorumluluğunu bulanıklaştırmadan, saha gerçekliğini bozmadan ve çalışan mahremiyetini ezmeden kullanabilen uzman olacaktır.

## 11. Tartışma

Yapay zekâ, İSG ve TMGD sektörlerinde iki uç beklenti yaratmaktadır. Bir uçta, yapay zekânın tüm işleri çözeceğine inanan teknolojik iyimserlik vardır. Diğer uçta ise yapay zekânın mesleki değeri ortadan kaldıracığı korkusu bulunur. Gerçek, bu iki ucun arasında daha serin bir yerde durmaktadır. Yapay zekâ, doğru kurulduğunda mesleki kaliteyi artırır; yanlış kurulduğunda ise hızlı ve süslü hatalar üretir. İSG açısından yapay zekânın en büyük potansiyeli, önleyici yaklaşımı güçlendirmesidir. Ramak kala kayıtları, bakım verileri, eğitim eksikleri ve saha uygunsuzlukları birlikte okunduğunda kaza olmadan önce risk yoğunluğu görülebilir. Bu, 6331 sayılı Kanun'un önleyici yaklaşımıyla uyumludur. Ancak çalışanı izleyen, puanlayan ve baskılayan sistemler psikososyal riskleri artırabilir. Bu nedenle yapay zekâ destekli İSG uygulamaları, çalışan katılımı ve şeffaflık ilkesiyle yürütülmelidir. TMGD açısından yapay zekânın en büyük potansiyeli, karmaşık mevzuat ve evrak süreçlerinde hata yakalama kapasitesidir. ADR hükümleri, işletme taraf rolleri ve kimyasal veriler bir araya geldiğinde insan hatası riski yüksektir. Yapay zekâ, tekrar eden evrak hatalarını, miktar tutarsızlıklarını ve uyumsuz depolama sinyallerini erken gösterebilir. Buna karşılık sınıflandırma, muafiyet değerlendirmesi, güvenlik planı gerekliliği ve resmi uygunluk görüşü gibi kritik alanlarda insan denetimi vazgeçilmezdir. Bu çalışmanın önerdiği temel ilke şudur: Yapay zekâ, İSG ve TMGD'de 'yetkili karar verici' değil, 'akıllı yardımcı denetçi' olarak konumlandırılmalıdır. Bu yardımcı; veri toplar, özetler, karşılaştırır, uyarır ve taslak üretir. İnsan uzman ise bağlamı değerlendirir, mevzuatı doğrular, sahayı okur, etik sınırı korur ve nihai kararı verir. Böyle bir modelde yapay zekâ mesleği küçültmez; uzmanı angaryadan kurtarıp mesleğin özüne yaklaştırır.

## 12. Sonuç ve Öneriler

İSG ve TMGD sektörlerinde yapay zekâ entegrasyonu artık uzak bir gelecek konusu değildir. Saha fotoğrafı analizi, risk değerlendirmesi desteği, eğitim içerik üretimi, kimyasal envanter yönetimi, SDS özetleme, ADR evrak kontrolü, ramak kala eğilim analizi ve rapor taslak üretimi bugün uygulanabilir hale gelmiştir.

Ancak bu uygulanabilirlik, kontrolsüz kullanım anlamına gelmez. Sektörün ihtiyacı, hız ile sorumluluğu aynı masaya oturtan bir yönetim yaklaşımıdır. Bu kitap bölümü, yapay zekânın İSG ve TMGD alanlarında en doğru kullanımının insan merkezli karar destek modeli olduğunu savunmaktadır. Bu modelde yapay zekâ, tekrar eden ve veri yoğun işleri hızlandırır; uzman ise mevzuat, saha gerçekliği, etik ve nihai karar sorumluluğunu taşır. Böylece hem işveren yükümlülükleri hem danışmanlık mesleğinin niteliği hem de çalışanların güvenliği korunabilir. Uygulama açısından kuruluşlara şu öneriler getirilebilir: Öncelikle yapay zekâ kullanım politikası hazırlanmalı; hangi verilerin kullanılacağı, hangi çıktının nasıl doğrulanacağı ve hangi kararların otomatikleştirilemeyeceği yazılı hale getirilmelidir. İkinci olarak pilot uygulamalar küçük ve ölçülebilir alanlarda başlatılmalıdır. Üçüncü olarak İSG ve TMGD profesyonellerine yapay zekâ okuryazarlığı eğitimi verilmelidir. Dördüncü olarak kişisel veri, sağlık verisi ve işletme güvenliği açısından veri gizliliği kuralları netleştirilmelidir. Beşinci olarak yapay zekâ çıktıları düzenli olarak kalite denetimine tabi tutulmalıdır. Son söz şudur: Yapay zekâ, İSG ve TMGD sektöründe doğru kullanılırsa masaya yeni bir akıl koyar; yanlış kullanılırsa masadaki sorumluluğu dağıtır. Bu nedenle mesele yapay zekâyı kullanıp kullanmamak değil, onu hangi sınırlarla, hangi denetimle ve hangi mesleki etikle kullanacağımızdır. Güvenli gelecek, algoritmanın hızını insan vicdanı ve uzman aklıyla bağlayanların olacaktır.

**Teşekkür:** Tüm zorluklara rağmen soy ismim gibi YILMAZ olduğum için kendime teşekkürü bir borç bilirim.

## Kaynakça

- 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu. (2012). Resmî Gazete. <https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/1.5.6331-20150404.pdf>
- European Agency for Safety and Health at Work. (2025). Work transformed: How AI is rewriting the challenges for safety and health. <https://osha.europa.eu/en/oshnews/work-transformed-how-ai-rewriting-challenges-safety-and-health>
- European Union. (2024). Regulation (EU) 2024/1689 laying down harmonised rules on artificial intelligence (Artificial Intelligence Act). <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/regulatory-framework-ai>
- International Labour Organization. (2025). Revolutionizing health and safety: The role of AI and digitalization at work. <https://www.ilo.org/publications/revolutionizing-health-and-safety-role-ai-and-digitalization-work>
- International Organization for Standardization. (2023). ISO/IEC 42001:2023 Artificial intelligence management system. <https://www.iso.org/standard/42001>
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2024). OECD AI principles. <https://oecd.ai/en/ai-principles>
- United Nations Economic Commission for Europe. (2024). Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road: ADR 2025. <https://unece.org/adr-2025-files>
- Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı. (2022). Tehlikeli Madde Güvenlik Danışmanlığı Hizmetleri Hakkında Yönetmelik. [https://uhdgm .uab.gov.tr/uploads/pages/yonetmelikler/tmgd-hizmetleri-yonetmelik.pdf](https://uhdgm.uab.gov.tr/uploads/pages/yonetmelikler/tmgd-hizmetleri-yonetmelik.pdf)



## *BÖLÜM 11*

# Sürdürülebilir Kompozit Uygulamaları İçin Isırgan (*Urtica dioica L.*) Liflerinde Çürütme Yöntemlerinin Değerlendirilmesi

*Elif Sultan Akpınar<sup>1</sup>*

## 1. Giriş

Artan çevresel sorunlar, fosil bazlı sentetik liflerin yüksek enerji tüketimi ve mikropplastik kaynaklı çevresel etkileri nedeniyle sürdürülebilir doğal liflere olan ilgi son yıllarda önemli ölçüde artmıştır. Tekstil ve kompozit endüstrilerinde çevre dostu hammaddelerin kullanımına yönelik eğilim, biyobozunur, yenilenebilir ve düşük karbon ayak izine sahip lignoselülozik liflerin yeniden değerlendirilmesini sağlamıştır (Ajayi et al., 2025; Faruk et al., 2012; Samanta et al., 2021). Polimer kompozitlerde sentetik lif kullanımını azaltma gereksinimi, doğal lif takviyeli polimer kompozitlere (NFCs) sürdürülebilir alternatif malzemeler olarak ilgiyi artırmıştır. (Navaratnam et al., 2023) Polimer kompozitlerin üretiminde dolgu malzemesi olarak sentetik elyafların kullanımının azaltılması arzu edilir ve bu doğal elyaf takviyeli polimer kompozitlerin giderek daha fazla kullanılmasıyla sağlanabilir (Akhil et al., 2023). Bu kapsamda doğal lifler; düşük yoğunluk, iyi özgül dayanım, geri dönüştürülebilirlik ve sürdürülebilir üretim avantajları nedeniyle hem teknik tekstillerde hem de biyokompozit uygulamalarında önemli bir alternatif malzeme grubu olarak değerlendirilmektedir (Palanisamy et al., 2024; Pickering et al., 2016).

Elyaf takviyeli polimer kompozitlerin geliştirilmesi, modern mühendislik uygulamalarının yapısal ve fonksiyonel gereksinimlerini karşılamanın yanı sıra malzeme bilimi ve teknolojisinde yenilikçi yaklaşımların gelişmesine katkı sağlamıştır.

Doğal lif takviyeli kompozitler özellikle otomotiv, yapı, ambalaj ve izolasyon sektörlerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Keten, kenevir, jüt ve ısırgan gibi lignoselülozik liflerle güçlendirilmiş polimer kompozitlerin; düşük ağırlık, titreşim sönümleme kapasitesi ve çevresel sürdürülebilirlik avantajları sayesinde sentetik lif takviyeli kompozitlere alternatif oluşturduğu bildirilmektedir.

---

<sup>1</sup> Öğr. Gör., Giresun Üniversitesi Bulancak Meslek Yüksekokulu, Tekstil, Giyim, Ayakkabı ve Deri Böl., ORCID:0000-0003-1602-4923

Özellikle otomotiv iç panel uygulamaları, biyobozunur yapı elemanları ve hafif kompozit sistemlerde doğal lif kullanımının giderek arttığı belirtilmektedir. (Ahmed et al., 2025; Koronis et al., 2013; Pickering et al., 2016). Doğal lif takviyeli polimer kompozitler, düşük yoğunlukları, yenilenebilir olmaları ve çevresel avantajları nedeniyle sentetik lif takviyeli kompozitlere alternatif malzemeler olarak değerlendirilmektedir (Faruk et al., 2012; Jawaaid & Abdul Khalil, 2011). Avrupa Birliği'nin döngüsel ekonomi politikaları ve biyoesaslı malzemelerin kullanımını teşvik eden stratejileri, doğal lif takviyeli biyokompozitlere yönelik araştırmaların ve endüstriyel uygulamaların hızla artmasına katkı sağlamıştır (European Commission, 2020). Söz konusu kompozitlerin avantajları ve sınırlılıkları Tablo 1'de özetlenmiştir.

| Avantajlar                                                                                                                                     | Dezavantajlar                                                                                                                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Düşük yoğunluk ile birlikte yüksek özgül dayanım ve rijitlik sağlamaları                                                                       | Sentetik elyaf takviyeli kompozitlere kıyasla daha düşük dayanıklılığa sahip olmaları; ancak uygun işlemlerle bu durum önemli ölçüde iyileştirilebilir |
| Yenilenebilir bir kaynak olmaları; üretimlerinin düşük enerji gerektirmesi, CO <sub>2</sub> absorbe etmeleri ve çevreye oksijen kazandırmaları | Yüksek nem absorpsiyonu nedeniyle şişme eğilimi göstermeleri                                                                                           |
| Sentetik elyaflara kıyasla daha düşük maliyetle üretilebilmeleri.                                                                              | Özellikle darbe dayanımı açısından sentetik elyaf takviyeli kompozitlere göre daha düşük mekanik dayanım göstermeleri                                  |
| Üretim süreçlerinde daha düşük sağlık ve güvenlik riski oluşturmaları                                                                          | Özelliklerinde daha yüksek değişkenlik bulunması                                                                                                       |
| Isıl işlem veya kullanım ömrü sonunda yakma işlemi sırasında daha düşük toksik gaz emisyonu oluşturmaları                                      | Düşük işlem sıcaklığına dayanabilmeleri nedeniyle kullanılacak matris seçeneklerinin sınırlı olması                                                    |
| Sentetik elyaf kompozitlerine kıyasla üretim ekipmanlarında daha az aşınmaya neden olmaları                                                    | —                                                                                                                                                      |

**Tablo 1.** Doğal Elyaf Kompozitlerinin (NFC'lerin) Avantajları ve Dezavantajları ((Pickering et al., 2016)

Doğal elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri; elyafın türü, hasat zamanı, lif ayırma yöntemi, en-boy oranı, uygulanan kimyasal veya fiziksel işlemler ve kompozit içerisindeki elyaf miktarı gibi elyaf kaynaklı parametrelerin yanı sıra matris malzemesi, elyaf-matris ara yüzey etkileşimi, elyaf dağılımı, elyaf yönlenmesi, üretim prosesi ve gözeneklilik gibi yapısal faktörlerden önemli ölçüde etkilenmektedir (Ajayi et al., 2025; Büyükkaya & Demirer, 2020; Palanisamy et al., 2024; Pickering et al., 2016).

- **Lif Seçimi:** Yapısal uygulamalar için yüksek selüloz içeriğine sahip bitkisel lifler (keten, kenevir, jüt vb.) tercih edilir (Mustafa et al., 2015; Shah et al., 2014). Lif özellikleri; hasat zamanı, ekstraksiyon



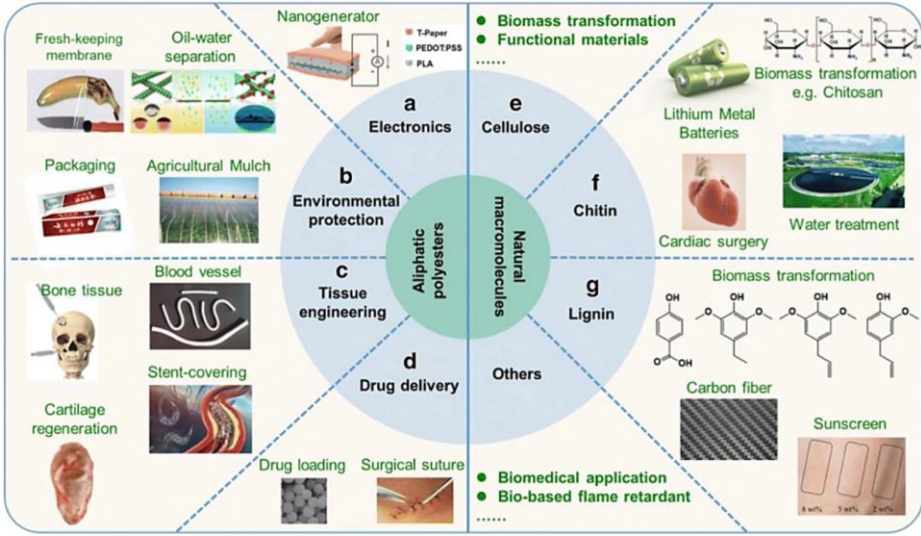
yöntemi ve yetiştirme koşullarına bağlı olarak büyük değişkenlik gösterir (Mustafa et al., 2015)

- **Matris Seçimi:** Doğal liflerin termal kararlılığı (yaklaşık 200 °C altı) matris seçeneklerini sınırlandırır (De Rosa et al., 2010). Polipropilen (PP) ve polietilen (PE) en yaygın termoplastik matrislerken, biyotürevli PLA mekanik performans açısından öne çıkmaktadır (De Rosa et al., 2010; Dittenber & GangaRao, 2012; Faruk et al., 2012).
- **Arayüz Gücü:** Hidrofilik lifler ile hidrofobik matrisler arasındaki zayıf bağ, mekanik performansı sınırlar (Zini & Scandola, 2011). Bunu iyileştirmek için alkali, silan ve MAPP (maleik anhidrit aşılı polipropilen) gibi kimyasal tedaviler veya plazma ve ısıtma işlemi gibi fiziksel yöntemler kullanılır (Brahim & Cheikh, 2007).
- **Lif Dağılımı ve Yönelimi:** Liflerin matris içinde topaklanmadan dağılması ve yük yönüne paralel hizalanması en iyi mekanik özellikleri sağlar (Carr et al., 2005). Dinamik tabaka şekillendirme (DSF) gibi yöntemler lif hizalamada etkili sonuçlar vermektedir (Pickering K., 2008).
- **Üretim ve Gözeneklilik (Manufacturing and Porosity):** Enjeksiyon kalıplama, kompresyon kalıplama ve reçine transfer kalıplama (RTM) yaygın yöntemlerdir (Ho et al., 2012). Süreç sırasında hapsolan hava ve liflerin içindeki boşluklar (lümen) gözenekliliğe neden olarak performansı düşürebilir (Niu et al., 2012).

Doğal elyaf takviyeli kompozitlerin (NFC'lerin) en önemli avantajlarından biri de yüksek biyobozunurluk özellikleridir. Bu özellik, kullanım ömrünü tamamlayan kompozit malzemelerin çevresel etkilerinin azaltılmasına katkı sağlamakta ve sentetik kompozitlere kıyasla daha sürdürülebilir bertaraf seçenekleri sunmaktadır. Petrol kökenli hammaddelerden üretilen geleneksel kompozitler çevrede uzun süre kalabilmekte ve çoğu zaman enerji yoğun geri dönüşüm veya atık yönetimi süreçlerine ihtiyaç duymaktadır. Buna karşılık doğal elyaf takviyeli kompozitler biyolojik süreçler sonucunda daha kolay parçalanarak çevreye zararlı olmayan organik bileşenlere dönüşebilmektedir. Jüt, kenevir, keten, yün ve ipek gibi doğal lifler uygun koşullarda ayrılarak doğal madde döngüsüne katılmakta, atık depolama alanlarındaki yükün azaltılmasına ve çevresel sürdürülebilirliğin desteklenmesine katkı sağlamaktadır (Kamarudin et al., 2022; Naik et al., 2022; Santhosh et al., 2024).

Biyobozunur malzemelerin kullanım alanları arasında elektronik uygulamalar, ambalajlama sistemleri, doku mühendisliği, ilaç taşıma sistemleri ve doğal kaynakların korunmasına yönelik teknolojiler yer almaktadır (Şekil 1). Ayrıca selüloz, kitin ve lignin gibi doğal biyopolimerlerin pil teknolojileri,

cerrahi uygulamalar, su arıtma sistemleri ve karbon fiber üretiminde kullanıldığı bildirilmektedir (Samir et al., 2022).



Şekil 1: Biyolojik olarak parçalanabilir malzemelerin uygulamaları (Samir et al., 2022)

Isırgan otu (*Urtica dioica* L.), yüksek selüloz içeriği, düşük yoğunluğu ve iyi mekanik özellikleri nedeniyle sürdürülebilir tekstil ve kompozit uygulamaları açısından dikkat çeken doğal lif kaynaklarından biridir. Literatürde ısırgan liflerinin uzun lif yapısı, iyi çekme dayanımı ve doğal parlaklığı sayesinde tekstil uygulamalarında kullanılabileceği belirtilmektedir (Bacci et al., 2010). Ayrıca ısırgan liflerinin polimer matrisli kompozitlerde mekanik performansı artırabildiği ve doğal lif takviyeli biyokompozitler için uygun bir alternatif oluşturduğu bildirilmektedir (Masłowski et al., 2021). Bunun yanında ısırgan liflerinin düşük çevresel etkiyle üretilebilmesi ve yabancı olarak yetişebilmesi sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Akpınar & Palamutcu, 2026).

Bitkisel liflerin tekstil ve kompozit uygulamalarında kullanılabilmesi için soymuk liflerinin bitki gövdesinden veya odunsu özden ayrılması temel bir gerekliliktir ((Laloğlu & Atik, 2025; Lee et al., 2020; Sisti et al., 2016). Literatürde “**çürütme (retting)**” olarak tanımlanan bu ekstraksiyon işlemi; mekanik, biyolojik (su ve çiyde çürütme), enzimatik ve kimyasal yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmektedir (Hindi et al., 2025; Laloğlu & Atik, 2025; Vijayalakshmi et al., 2026). Su ile çürütme yöntemi, yüksek kalitede, homojen ve üniform liflerin elde edilmesine olanak tanınması nedeniyle tarihsel olarak en yaygın kullanılan yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir (Hindi et al., 2025; Lee et al., 2020). Ancak, 7 ila 21 gün arasında değişebilen uzun işlem süresi, yüksek miktarda su tüketimi, proses kontrolünün zorluğu ve çevre kirliliğine yol

açan kontamine atık su üretimi bu yöntemin en önemli dezavantajları arasında yer almaktadır (Laloğlu & Atik, 2025; Lee et al., 2020; Vijayalakshmi et al., 2026).

Kimyasal çürütme yöntemleri ise işlem süresini azaltması ve liflerin bitki dokusundan daha hızlı ayrılmasını sağlaması nedeniyle alternatif bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Özellikle NaOH ve KOH gibi alkali çözeltiler lignin, hemiselüloz ve pektik maddelerin çözünmesini hızlandırırken; organik asitler lif yüzeyinin temizlenmesine katkı sağlamaktadır (Sood et al., 2020). Bununla birlikte agresif kimyasal işlemler lif yapısında deformasyona neden olarak lif mukavemetinde kayıplara yol açabilmektedir. Lif mukavemeti hem tekstil proseslerinde işlenebilirlik hem de kompozit yapılarda yük taşıma performansı açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle kimyasal çürütme parametrelerinin liflerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin belirlenmesi gerekmektedir. Önceki çalışmalarda bildirilen ısırgan otu liflerinin potansiyel uygulamaları, daha önceki incelememizde(Akpınar & Palamutcu, 2026) (Akpınar vd., 2025) özetlenmiş ve Tablo 2'te güncellenmiştir.

| Yıl  | Isırgan Türü | Uygulama Alanı             | Matris/Sistem           | İşlem/Uygulama                                  | Temel Katkı                                                                   | Kaynak                   |
|------|--------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 2005 | U. cannabina | İplik üretilebilirliği     | Tekstil lifi geliştirme | Su ile çürütme                                  | Çürütmenin lif inceliği ve eğrilebilirlik üzerine etkisi gösterildi           | (Huang, 2005)            |
| 2008 | U. dioica    | Lif karakterizasyonu       | Lif demetleri           | Mekanik ekstraksiyon                            | Kompozit uygulamalar için uygun çekme dayanımı rapor edildi                   | (Bodros & Baley, 2008)   |
| 2010 | U. dioica    | Tekstil lifi ekstraksiyonu | Lif demetleri           | Su, kimyasal, enzimatik ve mikrobiyal yöntemler | Ekstraksiyon yönteminin lif özelliklerini önemli ölçüde etkilediği gösterildi | (Bacci et al., 2010)     |
| 2012 | U. dioica    | Biyokompozitler            | PLA                     | Lif takviyesi                                   | Isırgan takviyeli PLA'nın çevreci kompozit sistemi olduğu gösterildi          | (Fischer et al., 2012)   |
| 2013 | U. dioica    | Polimer kompozitler        | PP                      | Ekstrüzyon + enjeksiyon kalıplama               | Isırgan takviyeli PP kompozitlerin mekanik performansı incelendi              | (Pauksztal et al., 2013) |

|      |                         |                                |                       |                                     |                                                                 |                              |
|------|-------------------------|--------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 2015 | U. dioica               | Çok amaçlı kullanım            | -                     | Derleme                             | Isırğanın çok yönlü endüstriyel bir bitki olduğu vurgulandı     | (Di Virgilio et al., 2015)   |
| 2017 | Girardinia diversifolia | Hafif panel üretimi            | PLA                   | Alkali işlem + kartlama + presleme  | Isırğan/PLA kompozitlerinin özellikleri araştırıldı             | (Kumar & Das, 2017))         |
| 2017 | U. dioica               | Kompozitler                    | Derleme               | Literatür incelemesi                | Yeşil kompozitlerde ısırğan kullanımının özeti verildi          | (Agus Suryawan et al., 2017) |
| 2020 | Girardinia diversifolia | Lif morfolojisi ve özellikleri | -                     | Geleneksel ekstraksiyon             | Himalaya ısırğanının tekstil ve kompozit potansiyeli gösterildi | (Sood et al., 2020)          |
| 2020 | U. dioica               | Tarımsal yetiştiricilik        | Lif verimi            | Yoğunluk varyasyonu                 | Bitki yoğunluğunun lif kalitesine etkisi incelendi              | (Kakabouki et al., 2020)     |
| 2021 | U. dioica               | Kompozit                       | Epoksi                | Silan işlemi (%3–9)                 | Eğilme dayanımı ve ara yüzey özellikleri geliştirildi           | (Suarsana et al., 2021)      |
| 2022 | Himalaya ısırğanı       | Kompozit uygunluğu             | Lif ekstraksiyonu     | NaOH + NaClO <sub>2</sub>           | Selüloz oranının artırılması sağlandı                           | (Deepa & Kumaresan, 2022)    |
| 2023 | Himalaya ısırğanı       | Polimer kompozitler            | Epoksi                | Kompozit üretimi ve karakterizasyon | Mekanik ve termal özellikler değerlendirildi                    | (Deepa et al., 2023)         |
| 2024 | Himalaya ısırğanı       | Yüzey modifikasyonu            | Epoksi / Termoplastik | Alkali, silan ve peroksit işlemleri | Kimyasal işlemlerin takviye performansını artırdığı gösterildi  | (Mudoi & Sinha, 2025)        |
| 2024 | U. dioica               | Biyopolimer kompozitler        | PLA                   | NaOH enkapsülasyonu                 | PLA kompozitlerinin termal ve yanıcılık özellikleri incelendi   | (Majka et al., 2024)         |

|      |                   |                               |        |                             |                                                                                                              |                             |
|------|-------------------|-------------------------------|--------|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| 2025 | U. dioica         | Lif özellikleri               | -      | NaOH işlemi                 | Farklı ısırgan liflerinin özellikleri karşılaştırıldı                                                        | (Büyükkaya , 2025)          |
| 2025 | U. dioica + Sisal | Hibrit kompozitler            | Epoksi | %2 NaOH                     | Hibrit takviyenin mekanik performansı artırdığı gösterildi                                                   | (Adam et al., 2025)         |
| 2025 | U. dioica         | 3B baskılı kompozitler        | PLA    | FDM üretimi                 | Sürekli ısırgan lif takviyeli PLA kompozit üretimi gerçekleştirildi                                          | (Kilinc, 2025)              |
| 2026 | U. dioica         | Tekstil lifi karakterizasyonu | Lif    | 10 ve 21 gün su ile çürütme | Çürütme süresinin kristallik, morfoloji, termal davranış ve çekme özellikleri üzerindeki etkisi araştırıldı. | (Akpınar & Palamutcu, 2026) |

**Tablo 2:** ısırgan (*Urtica dioica* L.) liflerinin tekstil, kompozit ve ileri malzeme uygulamalarına yönelik literatürde bildirilen kullanım alanları. (Kaynak: Akpınar ve ark. (2025) çalışmasından uyarlanmış ve güncellenmiştir.)

Literatürde ısırgan liflerinin su ile çürütme süreçleri üzerine çeşitli çalışmalar bulunmasına rağmen, farklı asidik ve bazik kimyasal çözeltilerin ısırgan liflerinin tek lif mukavemeti üzerindeki etkisini karşılaştırmalı olarak inceleyen çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Özellikle tekstil ve biyokompozit uygulamalarına yönelik optimum kimyasal çürütme koşullarının belirlenmesine ilişkin çalışmalar yeterli düzeyde değildir.

Bu çalışmada, sürdürülebilir tekstil ve kompozit uygulamalarında kullanılabilecek ısırgan liflerinin farklı kimyasal çürütme yöntemleri ile elde edilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında NaOH, KOH, asetik asit ve sitrik asit kullanılarak farklı konsantrasyonlarda kimyasal çürütme işlemleri uygulanmış ve işlem sonrası elde edilen liflerin tek lif mukavemet özellikleri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçların, ısırgan liflerinin sürdürülebilir tekstil ve biyokompozit uygulamalarındaki kullanım potansiyeline katkı sağlaması hedeflenmektedir.

## 2. Materyal ve Metod

### 2.1. Lif eldesi ve Çürütme İşlemleri

Bu çalışmada kullanılan ısırgan (*Urtica dioica* L.) bitkileri, Temmuz 2024 tarihinde Türkiye'nin Karadeniz Bölgesi'nde yer alan Giresun ili Keşap ilçesindeki fındık bahçelerinin alt örtü ve kenar bölgelerinde doğal olarak yetişen popülasyonlardan hasat edildikten sonra 1 hafta güneşte ön kurutma işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 2).



Şekil 2: Kurutulmaya bırakılmış ısırgan

Lif eldesi amacıyla öncelikle geleneksel su çürütme yöntemi uygulanmıştır. Bu kapsamda ısırgan sapsı oda sıcaklığındaki suda 21 gün boyunca yaklaşık  $19 \pm 2$  °C sıcaklıktaki dağ suyunda, su değişimi yapılmaksızın çürütölmüştür. Çürütme işlemi sonunda sapsı sudan çıkarılmış, bol su ile yıkanmış ve oda sıcaklığında kurutulmuştur. Kurutma sonrasında liflerin bitki dokusundan kolaylıkla ayrıldığı gözlemlenmiştir.

Kimyasal çürütme işlemlerinin liflerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla ayrıca laboratuvar ölçekli deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde yaklaşık 20 cm uzunluğunda ve 100 g ağırlığında kurutulmuş ısırgan sapsı kullanılmıştır. Çürütme işlemleri sabit sıcaklık koşullarında (23°C %60 nem) 3 saat süreyle ayrı işlem kaplarında yürütölmüştür. Alkali çürütme uygulamalarında potasyum hidroksit (KOH) ve sodyum hidroksit (NaOH) çözeltileri 30 g ve 50 g konsantrasyonlarında hazırlanırken, asidik çürütme uygulamalarında asetik asit (CH<sub>3</sub>COOH) ve sitrik asit (C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>) çözeltileri 30 mL ve 50 mL miktarlarında kullanılmıştır. Her bir kimyasal uygulama bağımsız numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. İşlem sonunda numuneler kimyasal kalıntıların uzaklaştırılması amacıyla bol su ile yıkanmıştır.

Tablo 3’te yapılan deney uygulaması görülmektedir. Tablo da deney süresi, ortalama sıcaklık, Su başlangıç sertliği (1), işlem sonrası su sertliği (2), kimyasal konsantrasyonları, durulama işlemi ve kurutma işlemleri ile ilgili detaylı bilgiler yer almaktadır.

| Deney Sayısı | Deney süresi(Saat ) | Kullanılan Kimyasal                          | Sıcaklık (°C) | Su Sertlik(1 ) | Su Sertlik (2) | %Değeri (Konsantrasyonu ) | Durulam a İşlemi | Kurutm a İşlemi |
|--------------|---------------------|----------------------------------------------|---------------|----------------|----------------|---------------------------|------------------|-----------------|
| 1            | 3                   | KOH                                          | 20            | 284            | 999x10         | %3(30gr/L su)             | Musluk Suyu      | Oda Sıcaklığı   |
| 2            | 3                   | NaOH                                         | 16            | 345            | 999x10         | %3(30gr/L)                | Musluk Suyu      | Oda Sıcaklığı   |
| 3            | 3                   | KOH                                          | 18            | 345            | 999x10         | %5(50gr/1L)               | Musluk Suyu      | Oda Sıcaklığı   |
| 4            | 3                   | NaOH                                         | 18            | 344            | 999x10         | %5(50gr/L)                | Musluk Suyu      | Oda Sıcaklığı   |
| 5            | 3                   | CH <sub>3</sub> COOH                         | 18            | 345            | 999x10         | %3(30ml/L)                | Musluk Suyu      | Oda Sıcaklığı   |
| 6            | 3                   | CH <sub>3</sub> COOH                         | 18            | 345            | 999x10         | %5 (50ml/L)               | Musluk Suyu      | Oda Sıcaklığı   |
| 7            | 3                   | C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub> | 18            | 344            | 999x10         | %3 (30 ml/L)              | Musluk Suyu      | Oda Sıcaklığı   |

**Tablo 3: Kimyasal çürütme işlemleri**



**a)GMYO Tekstil Lab. b) Isırgan sapları(100gr)**



**c)Kullanılan Kimyasal miktarları**



**d)** Çürümeye bırakılan ısırgan sapları **e)** Kurumaya bırakılan Isırgan Sapları **f)** Çürütme sonrası soyulan lifler

**Şekil 3:** Laboratuvar ortamında çürütülen Isırgan Bitkisi (*Urtica Diocia L.*) Aşamaları (a,b,c,d,e,f)



Yıkama sonrasında liflerin saplardan manuel olarak kolaylıkla ayrıldığı gözlemlenmiş ve numuneler oda sıcaklığında kurutulmuştur. Kurutma işleminden sonra liflerin saplardan ayrılması için su ile hafif nemlendirme işlemi yapıp elle soyma işlemi gerçekleştirilmiştir. 100 gr ısırgan saplarından yaklaşık olarak 18 gr. taranmamış lif elde edildiği gözlemlenmiştir (Şekil 4). İfade edilen rakamın literatürle paralel olduğu görülmektedir. Fakat herhangi bir tarama işlemi gerçekleşmediğinden iplik elde etmek için tam olarak kullanılabilecek lif miktarı belirli değildir. Şekil 4-c’de gösterilen liflere denemek amacı ile bıçaklı rondoda küçültme işlemi uygulanmıştır. Liflerin çok parçalandığı gözlemlenmiştir. Yaklaşık %18 lif verimi elde edilmiştir.



**Şekil 4:** Elle soyulan lifler a) Lif ağırlığı, b) Soyulmuş taranmamış lif c) Soyulmuş mekanik işlem görmüş lif

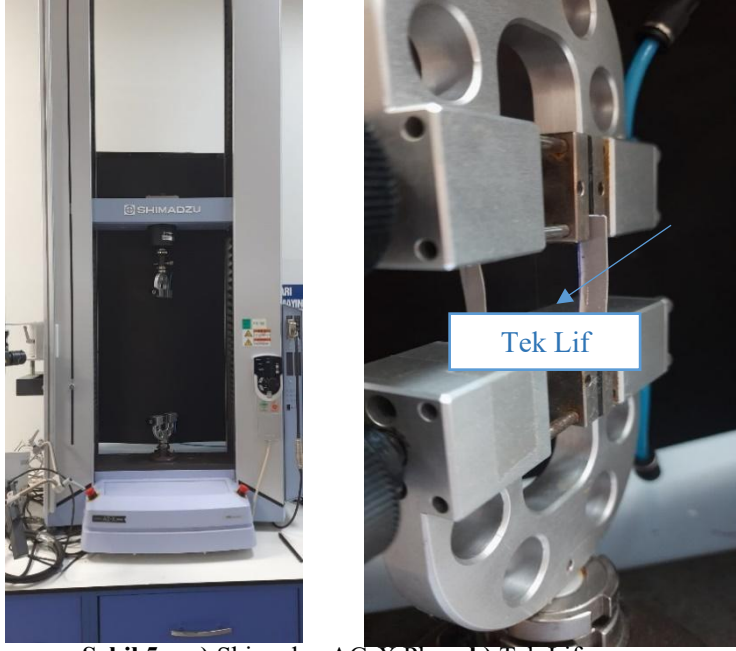
## 2.2 Tek Lif Mukavemet Testi

Isırgan liflerinin çekme özellikleri, ISO 5079:2020 ve ASTM D3822/D3822M-14(2020) standartlarına uygun olarak, sabit uzama hızı modunda çalışan Shimadzu AG-X Plus universal test cihazı kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 5). Test öncesinde lifler, ISO 139:2005 standardına göre  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  sıcaklık ve  $\%65 \pm 2$  bağıl nem koşullarında 24 saat süreyle kondisyonlanmıştır.

Birincil lifler stereo mikroskop altında dikkatlice ayrılmış, 10 mm ölçüm uzunluğuna sahip kâğıt çerçevelere yerleştirilmiş ve 10 mm/dak çapraz kafa hızı kullanılarak test edilmiştir. Kâğıt çerçevelerin kenarları testten hemen önce kesilerek liflerin serbest kalması sağlanmıştır.

Her çürütme grubu için (21 gün su çürütme ve kimyasal çürütme uygulamaları) ölçüm uzunluğu içerisinde kopma gösteren toplam 30 lif test edilmiştir. Kopma kuvveti (cN), kopma uzaması (%) ve elastikiyet modülü

değerleri cihaz yazılımı aracılığıyla elde edilmiştir. Liflerin mekanik özellikleri değerlendirilirken her bir gruba ait ortalama değerler ve standart sapmalar hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar kullanılarak farklı çürütme yöntemlerinin lif mukavemeti ve uzama özellikleri üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır.



Şekil 5 : a) Shimadzu AG-X Plus b) Tek Lif

### 2.3 Trinoküler Mikroskop Analizi

Su çürütme ve kimyasal çürütme yöntemleri ile elde edilen ısırgan (*Urtica dioica* L.) liflerinin yüzey morfolojilerindeki değişimleri incelemek amacıyla Optika B-293 trinoküler mikroskop analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde 21 gün süreyle su çürütme işlemine tabi tutulan lifler ile farklı konsantrasyonlarda kimyasal işlem uygulanmış lifler kullanılmıştır.

Mikroskopik inceleme öncesinde lif numuneleri oda sıcaklığında kurutulmuş ve yabancı maddelerden arındırılmıştır. Her bir uygulama grubundan rastgele seçilen lif örnekleri mikroskop lamı üzerine yerleştirilerek trinoküler mikroskop altında incelenmiştir. Liflerin yüzey yapısı, lif demetlerinin ayrılma durumu, yüzey temizliği ve lif bütünlüğü açısından değerlendirilmiştir. Görüntüler aynı büyütme oranında elde edilerek farklı çürütme yöntemlerinin lif morfolojisi üzerindeki etkilerinin karşılaştırılmasına olanak sağlanmıştır.

Elde edilen mikroskopik görüntüler kayıt altına alınmış ve değerlendirmelerde nitel gözlem yöntemi kullanılmıştır.

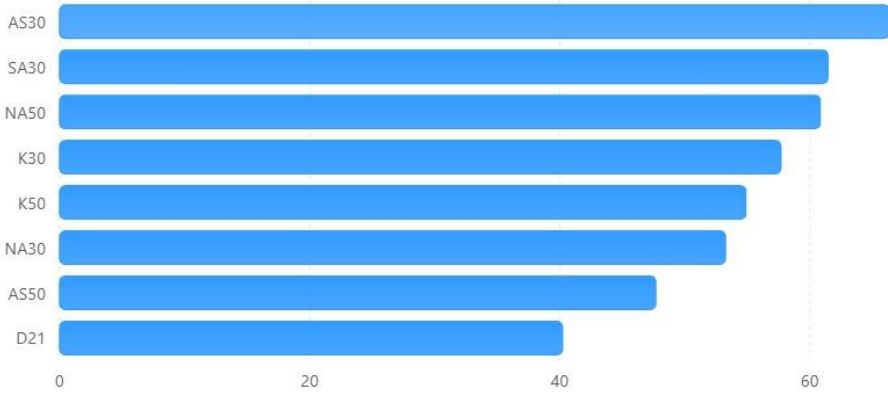
### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1 Tek Lif Mukavemet Sonuçlarının Tartışılması

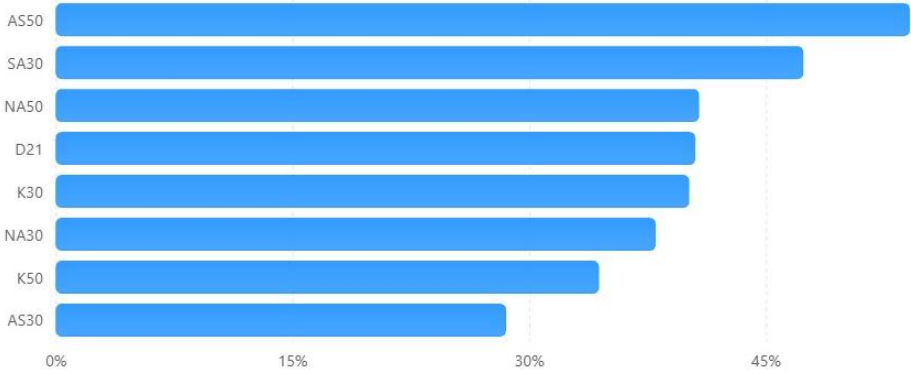
Farklı çürütme yöntemleri sonucunda elde edilen liflerin maksimum kuvvet ve kopma uzaması değerleri Tablo 4'de verilmiştir. Sonuçların daha net karşılaştırılabilmesi amacıyla maksimum kuvvet ve kopma uzaması değerleri Şekil 6 ve Şekil 7'de grafiksel olarak sunulmuştur.

| Numune | Maksimum Kuvvet (cN) | Kopma Uzaması (%) |
|--------|----------------------|-------------------|
| D21    | 40.23                | 40.45             |
| AS30   | 66.51                | 28.46             |
| AS50   | 47.69                | 54.05             |
| SA30   | 61.46                | 47.30             |
| NA30   | 53.26                | 37.94             |
| NA50   | 60.84                | 40.69             |
| K30    | 57.69                | 40.07             |
| K50    | 54.89                | 34.35             |

**Tablo 4:** Farklı çürütme yöntemleri uygulanmış ısırgan liflerinin tek lif çekme testi sonuçları



**Şekil 6:** Farklı çürütme yöntemleri uygulanmış ısırgan liflerinin maksimum kuvvet değerlerinin karşılaştırılması.



**Şekil 7:** Farklı çürütme yöntemleri uygulanmış ısırgan liflerinin kopma uzaması değerlerinin karşılaştırılması.

En yüksek maksimum kuvvet değeri 30 mL asetik asit uygulanan AS30 numunesinde (66,51 cN) elde edilirken, en düşük değer 21 gün su çürütme işlemine tabi tutulan D21 numunesinde (40,23 cN) belirlenmiştir. Bu durum, kontrollü kimyasal işlemlerin lif demetlerini bir arada tutan pektin ve hemiselüloz gibi amorf bileşenleri uzaklaştırırken selülozik yapıyı büyük ölçüde koruyabildiğini göstermektedir.

Su çürütme işlemi doğal lif üretiminde yaygın olarak kullanılan geleneksel bir yöntem olmasına rağmen, uzun işlem süresi boyunca gerçekleşen mikrobiyal faaliyetler liflerin yapısal bütünlüğünü olumsuz etkileyebilmektedir. Sisti ve ark. (2016), keten liflerinde çürütme süresinin uzamasıyla birlikte lif ayrışmasının iyileştiğini ancak aşırı çürütmenin mekanik özelliklerde azalmaya neden olabileceğini bildirmiştir. Bu çalışmada D21 numunesinin en düşük maksimum kuvvet değerini göstermesi, uzun süreli su çürütmenin lif hücre duvarında kısmi bozunmalara yol açabilmesiyle açıklanabilir.

Asetik asit uygulamalarında konsantrasyon artışıyla birlikte maksimum kuvvet değerinin düşmesi (66,51 cN'den 47,69 cN'ye), buna karşılık kopma uzamasının artması (%28,46'dan %54,05'e) lif yapısında daha yüksek esneklik oluştuğunu göstermektedir. Organik asitlerin özellikle pektik maddelerin çözünmesinde etkili olduğu ve lif yüzeyini temizlediği bilinmektedir. Ancak yüksek konsantrasyonlarda uygulandığında lif demetleri arasındaki bağların aşırı derecede zayıflaması nedeniyle mekanik dayanım azalabilmektedir. Benzer şekilde Pickering ve Beckermann (2006), doğal liflerin kimyasal işlemler sonrasında daha temiz yüzey yapısına sahip olduğunu ancak işlem şiddetinin artmasının mukavemet kayıplarına yol açabileceğini bildirmiştir.

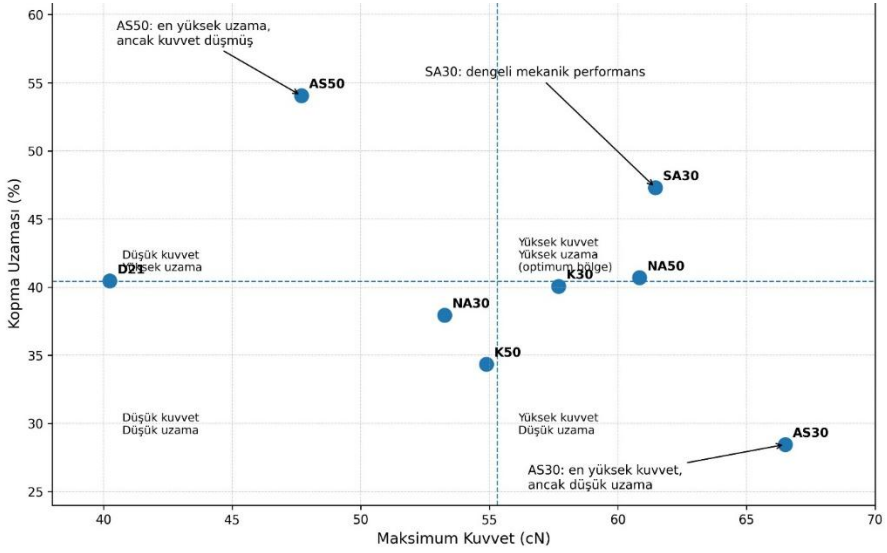
Sitrik asit uygulanan liflerde elde edilen yüksek maksimum kuvvet değeri (61,46 cN), sitrik asidin lif yüzeyindeki amorf bileşenleri uzaklaştırırken selülozik yapıyı büyük ölçüde koruduğunu göstermektedir. Aynı zamanda

%47,30'luk uzama değeri, mukavemet ve esneklik arasında dengeli bir performans ortaya koymuştur. Organik asitlerin çevre dostu yapısı dikkate alındığında, sitrik asit uygulaması sürdürülebilir lif işleme yöntemleri açısından dikkat çekici sonuçlar sunmaktadır.

Alkali işlemler değerlendirildiğinde, NaOH uygulamalarında konsantrasyonun artırılmasıyla maksimum kuvvet değerinin yükseldiği görülmüştür. Alkali işlemler sırasında hemiselüloz, pektin ve yüzey safsızlıklarının uzaklaştırılması liflerin bireyselleşmesini sağlamakta ve yük taşıyan selülozik yapının daha etkin hale gelmesine katkıda bulunmaktadır. Benzer sonuçlar Mwaikambo ve Ansell (2002) tarafından sisal liflerinde, Kabir ve ark. (2012) tarafından ise farklı lignoselülozik liflerde rapor edilmiştir (Kabir et al., 2012; Mwaikambo & Ansell, 2002). Araştırmacılar alkali işlemlerin lif yüzey pürüzlülüğünü artırdığını ve liflerin mekanik performansını belirli bir seviyeye kadar iyileştirdiğini belirtmişlerdir.

KOH uygulamalarında ise 30 g ve 50 g konsantrasyonları arasında önemli bir farklılık gözlenmemiştir. Bu durum, belirli bir konsantrasyonun üzerinde gerçekleştirilen alkali işlemlerin lif yapısında ilave iyileşme sağlamadığını düşündürmektedir. Aksine yüksek alkali konsantrasyonları selüloz zincirlerinde depolimerizasyon ve mikro fibril yapısında hasar oluşturarak liflerin kırılgenliğini artırabilmektedir. Bu nedenle KOH uygulamalarında optimum işlem koşullarının belirlenmesi önem taşımaktadır.

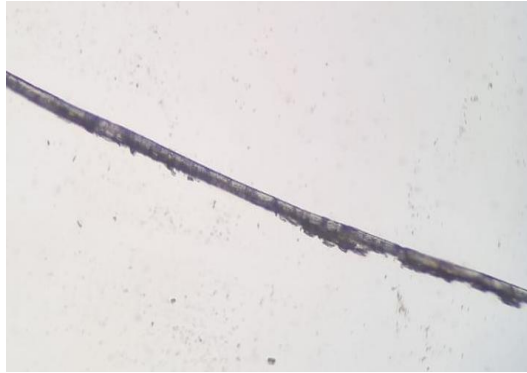
Elde edilen maksimum kuvvet ve kopma uzaması değerlerinin birlikte değerlendirilmesi amacıyla Şekil 8'de mekanik performans haritası oluşturulmuştur. Şekil 8 incelendiğinde, SA30 numunesinin hem yüksek maksimum kuvvet hem de yüksek kopma uzaması göstermesi nedeniyle optimum mekanik performans bölgesinde yer aldığı görülmektedir. AS30 numunesi en yüksek maksimum kuvvet değerine sahip olmasına rağmen daha düşük uzama göstermiştir. Buna karşılık AS50 numunesi en yüksek uzama değerini sergilemiş ancak mukavemet açısından daha düşük performans göstermiştir. D21 numunesi ise düşük mukavemet ve orta düzey uzama değerleri ile diğer uygulamalardan ayrılmıştır. Bu sonuçlar, farklı çürütme yöntemlerinin liflerin mekanik davranışlarını farklı şekillerde etkilediğini ve optimum performansın yalnızca mukavemet veya uzama değerleri tek başına değerlendirilerek belirlenemeyeceğini göstermektedir. Su çürütme yöntemi daha düşük mekanik performans göstermesine rağmen herhangi bir kimyasal kullanımını gerektirmemesi nedeniyle çevresel açıdan daha sürdürülebilir bir alternatif olarak değerlendirilebilir (Kabir et al., 2012; Pickering et al., 2016).



**Şekil 8:** Farklı çürütme yöntemleri uygulanmış ısırgan liflerinin maksimum kuvvet ve kopma uzaması değerlerine göre mekanik performans haritası.

### 3.2 Lif Morfolojisinin Trinoküler Mikroskop Görüntüleri ile Değerlendirilmesi

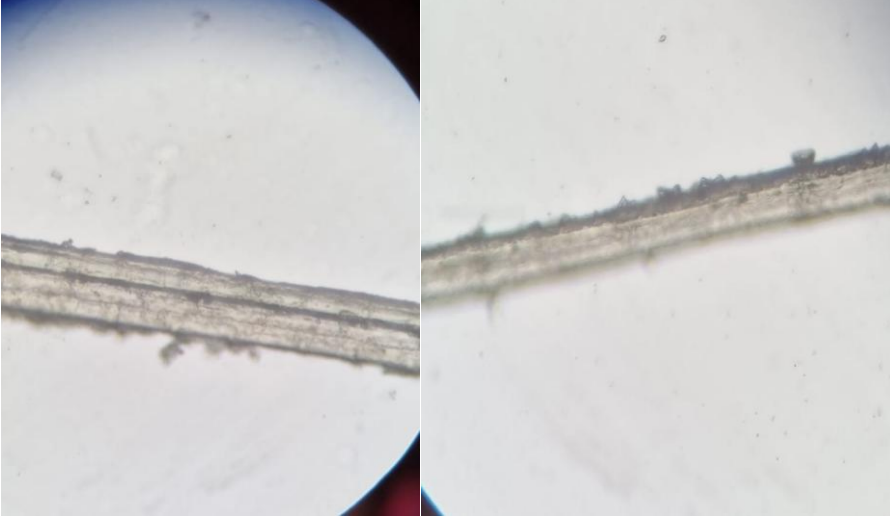
Su çürütme ve farklı kimyasal çürütme yöntemleri ile elde edilen ısırgan liflerinin yüzey morfolojileri trinoküler mikroskop yardımıyla incelenmiştir. Şekil 9’de işlem görmemiş ısırgan lifi görüntüsü bulunmaktadır.



**Şekil 9:** İşlem görmemiş (*Urtica Diocia L.*) lifi görüntüsü

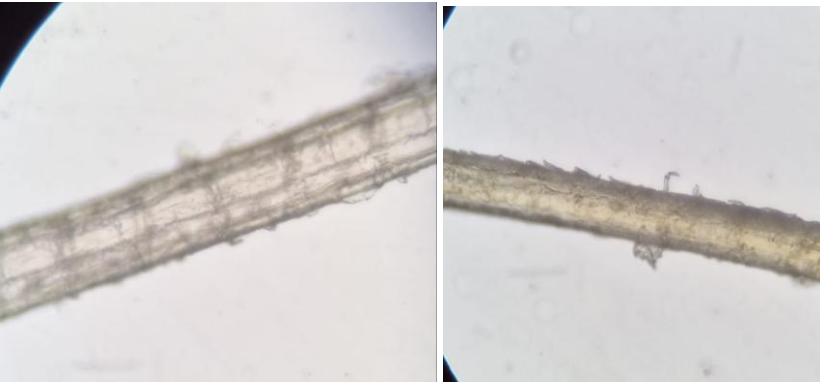
NaOH uygulanan liflerde, alkali işlemin etkisiyle lif yüzeyinin daha temiz ve belirgin hale geldiği görülmüştür. Özellikle NaOH konsantrasyonunun 30 g’dan 50 g’a yükseltilmesiyle lif demetlerinin daha fazla ayrıştığı ve yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 10-11). Bu durum, alkali işlemin lifleri bir arada tutan amorf bileşenlerin uzaklaştırılmasında etkili olduğunu

göstermektedir. Ancak yüksek konsantrasyonda uygulanan NaOH işlemlerinde lif yüzeyinde yer yer düzensizliklerin ve yüzey aşınmasının başladığı da dikkat çekmektedir.



**Şekil 10:** NaOH 30gr (x40) **Şekil 11:** NaOH 50 gr.(x40)

KOH uygulamalarında da benzer şekilde lif yüzeyinin temizlendiği ve lif demetlerinin daha belirgin hale geldiği gözlenmiştir. KOH miktarının artırılmasıyla lif yüzeyindeki bağlayıcı materyallerin uzaklaştırılma derecesinin arttığı görülmektedir. Bununla birlikte KOH uygulamalarında lif bütünlüğünün genel olarak korunduğu ve lif yapısında belirgin kopma veya parçalanma oluşmadığı belirlenmiştir (Şekil 12-13).

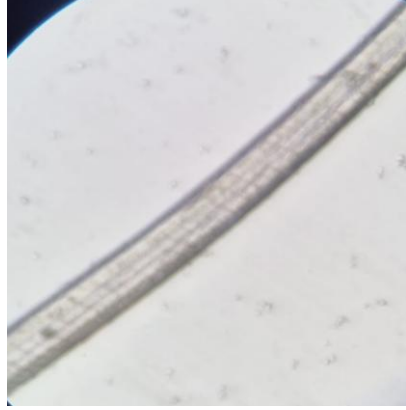
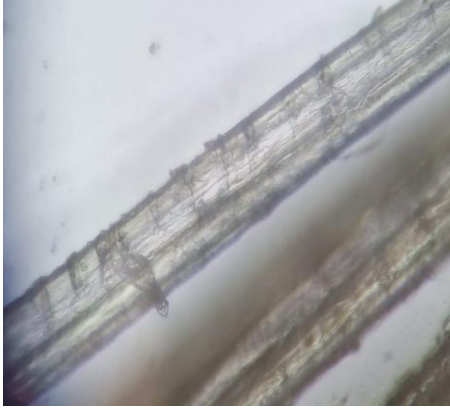


**Şekil 12:** KOH 30 gr.x40 **Şekil 13:** KOH 50gr.x40

Asetik asit ile işlem gören liflerde, lif demetlerinin daha net ayrıldığı ve yüzeydeki yabancı maddelerin önemli ölçüde uzaklaştırıldığı görülmüştür (Şekil 14-15). Özellikle 30 mL asetik asit uygulanan liflerde lif yapısının düzenli ve



homojen bir görünüm sergilediği dikkat çekmektedir. Asetik asit miktarının artırılmasıyla lif yüzeyinin daha düzgün hale geldiği, ancak bazı bölgelerde liflerin incelmeye başladığı gözlenmiştir.



**Şekil 14:** Asetik Asit 30mlx40 **Şekil 15:** Asetik Asit 50mlx40

Su çürütme yöntemi ile elde edilen liflerde ise lif demetlerinin ayrıştığı ancak kimyasal işlem uygulanmış liflere kıyasla yüzey üzerinde daha fazla kalıntı ve düzensizlik bulunduğu görülmektedir. Buna rağmen lif yapısının doğal morfolojisini büyük ölçüde koruduğu ve lif yüzeyinde kimyasal aşınmaya işaret eden belirgin bir hasar oluşmadığı gözlemlenmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, kullanılan kimyasal miktarı arttıkça lif yüzeyindeki pektik ve amorf bileşenlerin uzaklaştırılma derecesinin arttığı, buna bağlı olarak lif demetlerinin daha belirgin hale geldiği gözlenmiştir. Bununla birlikte yüksek kimyasal konsantrasyonlarında lif yüzeyinde aşınma ve yapısal bozulma belirtilerinin ortaya çıkması, optimum kimyasal işlem koşullarının belirlenmesinin önemini göstermektedir. Morfolojik gözlemler tek lif çekme testi sonuçlarıyla uyum göstermektedir.

#### **4. Sonuçlar:**

Bu çalışmada kullanılan ısırgan bitkileri Giresun ilinde fındık bahçelerinin alt örtüsünde doğal olarak yetişen ve çoğu zaman yabancı ot olarak değerlendirilen popülasyonlardan elde edilmiştir. Bu yönüyle çalışma, tarımsal üretim alanlarında ekonomik değeri bulunmayan biyokütlenin yüksek katma değerli tekstil ve kompozit hammaddesine dönüştürülmesine yönelik bir yaklaşım sunmaktadır.

Su ve farklı kimyasal çürütme yöntemlerinin ısırgan (*Urtica dioica L.*) liflerinin morfolojik ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin incelendiği araştırmada, elde edilen sonuçlar, kimyasal çürütme yöntemlerinin genel olarak su çürütme yöntemine kıyasla daha yüksek maksimum kuvvet değerleri



sağladığını göstermiştir. Özellikle AS30 numunesi en yüksek mukavemet değerini verirken, SA30 numunesi mukavemet ve uzama özellikleri bakımından en dengeli performansı sergilemiştir. Trinoküler mikroskop görüntüleri de kimyasal işlemler sonrasında lif demetlerinin daha belirgin hale geldiğini ve yüzeydeki amorf bileşenlerin uzaklaştırıldığını ortaya koymuştur.

Bununla birlikte, lif performansındaki artışın kimyasal tüketimi, atık oluşumu ve ilave proses gereksinimleri ile birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Kimyasal işlemlerde konsantrasyonun artırılması her zaman daha iyi mekanik özellikler sağlamamış, bazı uygulamalarda lif yapısında aşınma ve mekanik kayıplara yol açabilecek değişimler gözlenmiştir. Bu durum, kimyasal çürütme işlemlerinde optimum işlem koşullarının belirlenmesinin önemini ortaya koymaktadır.

Su çürütme yöntemi ise daha düşük mekanik performans göstermesine rağmen herhangi bir kimyasal kullanımını gerektirmemesi, düşük maliyetli olması ve doğal biyolojik süreçlerden yararlanması nedeniyle sürdürülebilir lif üretimi açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, su çürütme yöntemiyle elde edilen liflerin tekstil ve kompozit uygulamalarında kullanılabilecek yeterli mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermektedir.

Özellikle doğal lif takviyeli kompozitlerin giderek önem kazandığı günümüzde, yalnızca en yüksek mekanik performansın değil, hammaddenin çevresel etkisinin ve üretim sürecinin sürdürülebilirliğinin de dikkate alınması gerekmektedir. Bu açıdan değerlendirildiğinde, su çürütme yöntemiyle elde edilen ısırgan lifleri yenilenebilir, düşük çevresel etkiye sahip ve ekonomik bir takviye malzemesi olarak önemli bir potansiyel taşımaktadır. Gelecekte kontrollü biyolojik çürütme, enzimatik işlemler ve proses optimizasyonu çalışmaları ile su çürütme yönteminin geliştirilmesi hem sürdürülebilir tekstil üretimi hem de çevre dostu kompozit malzemelerin geliştirilmesi açısından önemli katkılar sağlayacaktır.

## KAYNAKÇA

- Adam, H. M., Bogale, T. M., & Paramasivam, V. (2025). Studies on mechanical properties characterization of hybrid sisal and stinging nettle fiber reinforced epoxy composite material. *Journal of Materials Research and Technology*, 37, 5086–5102. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.07.159>
- Agus Suryawan, I. G. P., Suardana, N. P. G., Suprpta Winaya, I. N., Budiarsa Suyasa, I. W., & Tirta Nindhia, T. G. (2017). Study of stinging nettle (*urtica dioica* L.) Fibers reinforced green composite materials: a review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 201(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/201/1/012001>
- Ahmed, R., Manik, K. H., Nath, A., Shohag, J. R., Mim, J. J., & Hossain, N. (2025). Recent advances in sustainable natural fiber composites: Environmental benefits, applications, and future prospects. *Materials Today Sustainability*, 32, 101220. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2025.101220>
- Ajayi, N. E., Rusnakova, S., Ajayi, A. E., Ogunleye, R. O., Agu, S. O., & Amenaghawon, A. N. (2025). A comprehensive review of natural fiber reinforced Polymer composites as emerging materials for sustainable applications. *Applied Materials Today*, 43, 102666. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2025.102666>
- Akhil, U. V., Radhika, N., Saleh, B., Aravind Krishna, S., Noble, N., & Rajeshkumar, L. (2023). A comprehensive review on plant-based natural fiber reinforced polymer composites: Fabrication, properties, and applications. In *Polymer Composites* (Vol. 44, Number 5, pp. 2598–2633). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/pc.27274>
- Akpınar, E. S., & Palamutcu, S. (2026). Characterization of Nettle Fibers (*Urtica dioica* L.) for Eco-Textile Applications: Influence of Water Retting Duration. *Journal of Natural Fibers*, 23(1), 2664560. <https://doi.org/10.1080/15440478.2026.2664560>
- Bacci, L., Di Leonardo, S., Albanese, L., Mastromei, G., & Perito, B. (2010). Effect of different extraction methods on fiber quality of nettle (*Urtica dioica* L.). *Textile Research Journal*, 81(8), 827–837. <https://doi.org/10.1177/0040517510391698>
- Bodros, E., & Baley, C. (2008). Study of the tensile properties of stinging nettle fibres (*Urtica dioica*). *Materials Letters*, 62(14), 2143–2145. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.11.034>
- Brahim, S. Ben, & Cheikh, R. Ben. (2007). Influence of fibre orientation and volume fraction on the tensile properties of unidirectional Alfa-polyester composite. *Composites Science and Technology*, 67(1), 140–147. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.10.006>

- Büyükkaya, K. (2025). Examining the Physical and Thermal Properties of Nettle Fibers Obtained from Different Genetic Sources and Determining Their Usability as Reinforcement Materials in Composites. *Journal of Natural Fibers*, 22(1), 2519609. <https://doi.org/10.1080/15440478.2025.2519609>
- Büyükkaya, K., & Demirer, H. (2020). Examining the Mechanical and Thermomechanical Properties of Polymethylmethacrylate Composites Reinforced with Nettle Fibres. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45, 665–674. <https://doi.org/10.1007/s13369-019-04136-7>
- Carr, D. J., Cruthers, N. M., Laing, R. M., & Niven, B. E. (2005). Fibers from Three Cultivars of New Zealand Flax (*Phormium tenax*). *Textile Research Journal*, 75(2), 93–98. <https://doi.org/10.1177/004051750507500201>
- De Rosa, I. M., Kenny, J. M., Puglia, D., Santulli, C., & Sarasini, F. (2010). Tensile behavior of New Zealand flax (*Phormium tenax*) fibers. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(23), 3450–3454. <https://doi.org/10.1177/0731684409360573>
- Deepa, R., & Kumaresan, K. (2022). Stinging nettle fibres extraction and characterization using chemical retting method and influence of tensile properties. *Industrial Crops and Products*, 188, 115551. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115551>
- Deepa, R., Kumaresan, K., & Saravanan, K. (2023). Effect of Surface Modification of Himalayan Nettle Fiber and Characterization of the Morphology, Physical and Mechanical Properties. *AUTEX Research Journal*, 23(1), 126–131. <https://doi.org/10.2478/aut-2022-0010>
- Di Virgilio, N., Papazoglou, E. G., Jankauskiene, Z., Di Lonardo, S., Praczyk, M., & Wielgusz, K. (2015). The potential of stinging nettle (*Urtica dioica* L.) as a crop with multiple uses. *Industrial Crops and Products*, 68, 42–49. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.08.012>
- Dittenber, D. B., & GangaRao, H. V. S. (2012). Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(8), 1419–1429. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.11.019>
- European Commission. (2020). *A new Circular Economy Action Plan for a cleaner and more competitive Europe*. <https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/>
- Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H.-P., & Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in Polymer Science*, 37(11), 1552–1596. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>
- Fischer, H., Werwein, E., & Graupner, N. (2012). Nettle fibre (*Urtica dioica* L.) reinforced poly(lactic acid): A first approach. *Journal of Composite Materials*, 46(24), 3077–3087. <https://doi.org/10.1177/0021998311435676>

- Hindi, J., K, M., Heckadka, S. S., & B M, G. (2025). Retting and Chemical Treatment of Natural Fibers – A Review. *Journal of Natural Fibers*, 22(1), 2562479. <https://doi.org/10.1080/15440478.2025.2562479>
- Ho, M., Wang, H., Lee, J.-H., Ho, C., Lau, K., Leng, J., & Hui, D. (2012). Critical factors on manufacturing processes of natural fibre composites. *Composites Part B: Engineering*, 43(8), 3549–3562. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.10.001>
- Huang, G. (2005). Nettle (*Urtica cannabina* L.) fibre, properties and spinning practice. *Journal of the Textile Institute*, 96(1), 11–15. <https://doi.org/10.1533/joti.2004.0023>
- Jawaid, M., & Abdul Khalil, H. P. S. (2011). Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review. *Carbohydrate Polymers*, 86(1), 1–18. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.04.043>
- Kabir, M. M., Wang, H., Lau, K. T., & Cardona, F. (2012). Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview. *Composites Part B: Engineering*, 43(7), 2883–2892. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.053>
- Kakabouki, I., Zisi, C., Karydogianni, S., Priniotakis, G., Darawsheh, M. K., & Tselia, Z. (2020). Effect of Nettle (*Urtica dioica* L.) density on fiber yield and quality in a natural ecosystem under East Mediterranean conditions. *Journal of Phytology*, (12), 73–76. <https://doi.org/10.25081/jp.2020.v12.6326>
- Kamarudin, S. H., Mohd Basri, M. S., Rayung, M., Abu, F., Ahmad, S., Norizan, M. N., Osman, S., Sarifuddin, N., Desa, M. S. Z. M., Abdullah, U. H., Mohamed Amin Tawakkal, I. S., & Abdullah, L. C. (2022). A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composites (NFRPC) for Sustainable Industrial Applications. *Polymers*, 14(17). <https://doi.org/10.3390/polym14173698>
- Kilinc, A. C. (2025). Additive Manufacturing and Characterization of Continuous Nettle Fiber-Reinforced PLA Composites. *Polymers*, 17(17). <https://doi.org/10.3390/polym17172388>
- Koronis, G., Silva, A., & Fontul, M. (2013). Green composites: A review of adequate materials for automotive applications. *Composites Part B: Engineering*, 44(1), 120–127. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.07.004>
- Kumar, N., & Das, D. (2017). Alkali treatment on nettle fibers part II: design of experiment and desirability function approach to study enhancement of tensile properties. *The Journal of The Textile Institute*, 108(8), 1468–1475. <https://doi.org/10.1080/00405000.2016.1257347>
- Laloğlu, S., & Atik, C. (2025). Kompozit takviye malzemesi olarak kenevir lifi işlenmesine genel bir bakış. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 27(2), 347–363.

- Lee, C. H., Khalina, A., Lee, S. H., & Liu, M. (2020). A comprehensive review on bast fibre retting process for optimal performance in fibre-reinforced polymer composites. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 6074063. <https://doi.org/10.1155/2020/6074063>
- Majka, T. M., Piech, R., Piechaczek, M., & Ostrowski, K. A. (2024). The Influence of *Urtica dioica* and *Vitis vinifera* Fibers on the Thermal Properties and Flammability of Polylactide Composites. *Materials*, 17(6). <https://doi.org/10.3390/ma17061256>
- Masłowski, M., Aleksieiev, A., Miedzianowska, J., & Strzelec, K. (2021). Common Nettle (*Urtica dioica* L.) as an Active Filler of Natural Rubber Biocomposites. *Materials*, 14(7), 1616. <https://doi.org/10.3390/ma14071616>
- Mudoi, M. P., & Sinha, S. (2025). Surface modification of Himalayan nettle fibre with chemical treatments for potential reinforcement in polymer composites. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15(13), 19783–19803. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-06463-8>
- Mustafa, A., Abdollah, M. F. Bin, Shuhimi, F. F., Ismail, N., Amiruddin, H., & Umehara, N. (2015). Selection and verification of kenaf fibres as an alternative friction material using Weighted Decision Matrix method. *Materials & Design*, 67, 577–582. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.091>
- Mwaikambo, L. Y., & Ansell, M. P. (2002). Chemical modification of hemp, sisal, jute, and kapok fibers by alkalization. *Journal of Applied Polymer Science*, 84(12), 2222–2234. <https://doi.org/10.1002/app.10460>
- Naik, V., Kumar, Mohan, Vijayan, V., & Kaup, a. (2022). A Review on Natural Fiber Composite Material in Automotive Applications. *Engineered Science*, 18, 1–10. <https://doi.org/10.30919/es8d589>
- Navaratnam, S., Selvaranjan, K., Jayasooriya, D., Rajeev, P., & Sanjayan, J. (2023). Applications of natural and synthetic fiber reinforced polymer in infrastructure: A suitability assessment. *Journal of Building Engineering*, 66, 105835. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.105835>
- Niu, M., Liu, X., Dai, J., Hou, W., Wei, L., & Xu, B. (2012). Molecular structure and properties of wool fiber surface-grafted with nano-antibacterial materials. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 86, 289–293. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2011.10.038>
- Palanisamy, S., Vijayananth, K., Murugesan, T. M., Palaniappan, M., & Santulli, C. (2024). The prospects of natural fiber composites: A brief review. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 7(4), 496–506. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2024.01.003>
- Paukszta, D., Mańkowski, J., Kołodziej, J., & Szostak, M. (2013). Polypropylene (PP) Composites Reinforced with Stinging Nettle (*Urtica dioica* L.) Fiber. *Journal*

- of *Natural Fibers*, 10(2), 147–158.  
<https://doi.org/10.1080/15440478.2013.789287>
- Pickering K. (2008). *Properties and Performance of Natural-Fibre Composites* (K. L. Pickering, Ed.). Woodhead Publishing.
- Pickering, K. L., Efendy, M. G. A., & Le, T. M. (2016). A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 83, 98–112.
- Samanta, K. K., Roy, A. N., Baite, H., Debnath, S., Ammayappan, L., Nayak, L. K., Singha, A., & Kundu, T. K. (2021). Applications of nettle fibre in textile: A brief review. *International Journal of Bioresource Science*, 8(1), 39–45.  
<https://doi.org/10.30954/2347-9655.01.2021.6>
- Samir, A., Ashour, F. H., Hakim, A. A. A., & Bassyouni, M. (2022). Recent advances in biodegradable polymers for sustainable applications. *Npj Materials Degradation*, 6(1), 68. <https://doi.org/10.1038/s41529-022-00277-7>
- Santhosh, N., Praveena, B. A., Gowda, A. C., Duhduh, A. A., Rajhi, A. A., Alamri, S., Berwal, P., Khan, M. A., & Wodajo, A. W. (2024). *Innovative eco-friendly bio-composites: A comprehensive review of the fabrication, characterization, and applications*. *REVIEWS ON ADVANCED MATERIALS SCIENCE*, 63(1). <https://doi.org/doi:10.1515/rams-2024-0057>
- Shah, D. U., Porter, D., & Vollrath, F. (2014). Can silk become an effective reinforcing fibre? A property comparison with flax and glass reinforced composites. *Composites Science and Technology*, 101, 173–183.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.07.015>
- Sisti, L., Totaro, G., Vannini, M., Fabbri, P., Kalia, S., Zatta, A., & Celli, A. (2016). Evaluation of the retting process as a pre-treatment of vegetable fibers for the preparation of high-performance polymer biocomposites. *Industrial Crops and Products*, 81, 56–65.  
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.11.040>
- Sood, S., Bhardwaj, S., Kavita, & Dahiya, s. (2020). *Morphology And Properties Of The Stinging Nettle Fibre (Bisshu Ghass) In Himalayan Foot Hills*.
- Suarsana, I., Suryawan, I., Suardana, N. P. G., Winaya, S., Soenoko, R., Suyasa, B., Sunu, W., & Rasta, M. (2021). Flexural strength of hybrid composite resin epoxy reinforced stinging nettle fiber with silane chemical treatment. *AIMS Materials Science*, 8(2), 185–199. <https://doi.org/10.3934/matricsci.2021013>
- Vijayalakshmi, S., Yuvashree, M., & Samuthiramekala, S. (2026). Extraction and Characterization of Fibres from Cyperus SPP and Evaluate Potential as Textile Fibres. *International Journal for Multidisciplinary Research*, 8(2), IJFMR260272027.

Zini, E., & Scandola, M. (2011). Green composites: An overview. *Polymer Composites*, 32(12), 1905–1915.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pc.21224>



## *BÖLÜM 12*



# Su Kıtlığıyla Mücadelede Küresel Çözüm Modellerinin Ankara ve Bursa Ölçeğinde Değerlendirilmesi

*Ahmet Emir Köse<sup>1</sup> & Salim Serkan Nas<sup>2</sup> & Sadullah Baydaroğlu<sup>3</sup>*

## Giriş

Türkiye’de su kaynakları, iklim koşulları, havza özellikleri, nüfus yoğunluğu, tarımsal üretim, sanayi faaliyetleri ve kentsel büyüme baskısı altında giderek daha dikkatli yönetilmesi gereken stratejik bir unsur hâline gelmiştir. Son yıllarda yağış rejiminde görülen düzensizlikler, kurak dönemlerin sıklaşması, baraj doluluk oranlarında yaşanan dalgalanmalar ve altyapı kaynaklı su kayıpları, büyükşehirlerin su güvenliği açısından daha kırılgan bir yapıya yöneldiğini göstermektedir. Bu nedenle Türkiye’de su kıtlığı sorununun yalnızca doğal su miktarı üzerinden değil; suyun temini, dağıtımı, tüketimi, geri kazanımı ve korunması süreçleriyle birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir (MGM, 2025a; TOB, 2026; WWF-Türkiye, 2026).

Bu çalışmada, Türkiye’de su kıtlığı riski bakımından öne çıkan Ankara ve Bursa illeri karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Ankara, karasal iklim koşulları, düşük yağış potansiyeli, artan nüfus, uzun mesafeli su temin sistemlerine bağımlılık, tarımsal sulama baskısı ve yüksek kayıp-kaçak oranı nedeniyle su arz güvenliği açısından hassas bir yapıya sahiptir. Bursa ise Marmara Bölgesi’nde yer almasına rağmen yağış rejimindeki bozulma, baraj doluluk oranlarındaki dalgalanma, sanayi ve tarım ağırlıklı su kullanımı, yeraltı suyu üzerindeki baskı ve gelişmiş arıtma altyapısının sınırlılığı nedeniyle farklı nitelikte bir su yönetimi sorunu yaşamaktadır (ÇŞİDB, 2023; ÇŞİDB, 2025; ASKİ, 2024; BUSKİ, 2024).

Ankara ve Bursa’nın mevcut su durumu; yağış miktarları, sıcaklık eğilimleri, nüfus değişimi, baraj doluluk oranları, su temin kaynakları, sektörel su kullanımı, kayıp-kaçak oranları ve atıksu arıtma altyapısı üzerinden incelenmiştir. Böylece

<sup>1</sup> . Phd. Student, Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 29100 Gümüşhane, Türkiye.

ORCID:0000-0003-3890-5721

<sup>2</sup> Prof. Dr., Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 29100 Gümüşhane, Türkiye. ORCID:0000-0001-9054-4674

<sup>3</sup> Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 29100 Gümüşhane, Türkiye. ORCID:0009-0008-5795-5381

her iki ilin su kıtlığı bakımından hangi alanlarda benzerlik gösterdiği, hangi yönlerden ayrıştığı ve çözüm önceliklerinin nasıl farklılaştığı ortaya konulmuştur. Bu değerlendirme, yalnızca mevcut durumun betimlenmesiyle sınırlı tutulmamış; aynı zamanda şehirlerin uzun vadeli su güvenliği açısından hangi yönetim araçlarına ihtiyaç duyduğu da belirlenmiştir (DSİ, 2025; MGM, 2025b; TÜİK, 2026).

Ele alınan yaklaşım, Ankara ve Bursa için tek bir çözüm önerisinin yeterli olmayacağı kabulüne dayanmaktadır. Bu nedenle yağmur suyu hasadı, atıksuyun geri kazanımı, kayıp-kaçakların azaltılması, tarımsal sulamada verimlilik, sanayi su kullanımının iyileştirilmesi, sünger şehir uygulamaları, yeraltı suyu beslenmesi, baraj havzalarının korunması ve uzun mesafeli su temin sistemlerinin sürdürülebilirliği birlikte değerlendirilmiştir. Böylece her iki şehir için yerel koşullara göre şekillenen entegre ve hibrit bir su yönetimi çerçevesi oluşturulması amaçlanmıştır (Dinç, 2025; Huang vd., 2026; MSE, 2026; TOB, 2026).

### Türkiye’de Su Kıtlığı ve Havza Temelli Riskler

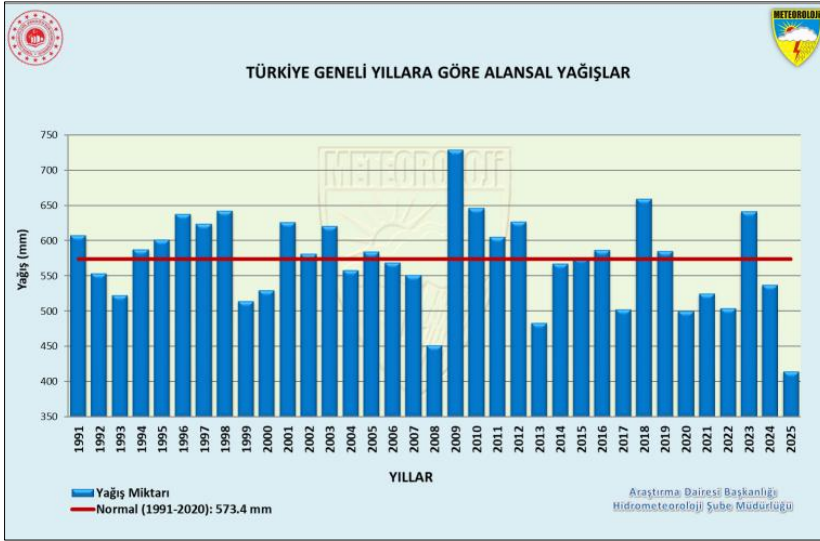
Türkiye’de su kaynaklarının dağılımı, iklim koşulları, topoğrafya, jeolojik yapı, bitki örtüsü ve havza özelliklerine bağlı olarak bölgesel farklılıklar göstermektedir. Ülke genelinde her biri kendine özgü hidrolojik özellikler taşıyan havzalar bulunmakta ve bu havzaların su potansiyeli ile nüfus, tarım, sanayi ve kentleşme baskısı arasında önemli dengesizlikler oluşmaktadır (Aydın vd., 2017; WWF-Türkiye, 2026).

Tablo 1. Türkiye’nin 25 nehir havzasındaki su durumu (WWF-Türkiye, 2026).

| Kesin Kıtlık           | Kıtlık            | Su Stresi              | Stressiz               |
|------------------------|-------------------|------------------------|------------------------|
| Marmara Havzası        | Susurluk Havzası  | Meriç-Ergene Havzası   | Batı Akdeniz Havzası   |
|                        |                   | Büyük Menderes Havzası | Antalya Havzası        |
| Küçük Menderes Havzası | Kuzey Ege Havzası | Yeşilırmak Havzası     | Batı Karadeniz Havzası |
|                        |                   | Kızılırmak Havzası     | Doğu Akdeniz Havzası   |
| Burdur Havzası         | Gediz Havzası     | Konya Kapalı Havzası   | Ceyhan Havzası         |
| Akarçay Havzası        | Sakarya Havzası   | Seyhan Havzası         | Dicle-Fırat Havzası    |
|                        | Asi Havzası       | Van Gölü Havzası       | Doğu Karadeniz Havzası |
|                        |                   |                        | Çoruh Havzası          |
|                        |                   |                        | Aras Havzası           |

Türkiye’de su kıtlığı; iklim değişikliğine bağlı kuraklıklar, verimsiz tarımsal sulama, hızlı kentleşme, nüfus artışı, sanayi baskısı, su kirliliği, ekosistem bozulması ve altyapı kayıplarıyla ilişkilidir. Havzalar arasında su varlığı farklılık

göstermekte, bazı havzalarda kullanım yenilenebilir kapasiteyi aşmaktadır. Marmara Bölgesi’nde nüfus yoğunluğuna karşılık su akış payının sınırlı kalması, su ve nüfus dağılımı arasındaki dengesizliği belirginleştirmektedir. Yağışın zamansal ve mekânsal dağılımı ise barajlar, yeraltı suları, tarımsal sulama ve kentsel su temini üzerinde doğrudan etkili temel bir göstergedir. Türkiye geneli yıllık alansal yağış dağılımı Şekil 1’de verilmiştir (WWF-Türkiye, 2023; Budak, 2025; MGM, 2025a; WWF-Türkiye, 2026).



Şekil 1. Türkiye geneli yıllara göre yağış dağılımı (MGM, 2025a).

2025 yılı, Türkiye’de meteorolojik kuraklık açısından dikkat çekici bir yıl olarak öne çıkmıştır. Bölgesel verilerin yanında il bazlı yağış sapmaları da Bursa ve Ankara’nın durumunu daha açık biçimde ortaya koymaktadır. Bu kapsamda Türkiye’nin il bazında 2025 yılı yağış normalinden sapma miktarları Tablo 2’de verilmiştir (MGM, 2025a).

Tablo 2. Türkiye’nin il bazında 2025 yılı yağış normalinden sapma miktarları (MGM, 2025a).

|                     |                   |                      |                  |
|---------------------|-------------------|----------------------|------------------|
| Adana: -46,4        | Adıyaman: -39,9   | Afyon: -31,2         | Ağrı: -17,2      |
| Aksaray: -33,2      | Amasya: -21,8     | <b>Ankara: -28,5</b> | Antalya: -33,7   |
| Ardahan: -22        | Artvin: -19,3     | Aydın: -31,6         | Balıkesir: -26,6 |
| Bartın: -14,6       | Batman: -40,3     | Bayburt: -8,1        | Bilecik: -37,8   |
| Bingöl: -22         | Bitlis: -30       | Bolu: -22,4          | Burdur: -26      |
| <b>Bursa: -39,6</b> | Çanakkale: -26,3  | Çankırı: -30,6       | Çorum: -37       |
| Denizli: -28,2      | Diyarbakır: -38,1 | Düzce: -16,8         | Edirne: -36,7    |
| Elazığ: -24,6       | Erzincan: -7,1    | Erzurum: -8,3        | Eskişehir: -33   |
| Gaziantep: -63,4    | Giresun: 24,1     | Gümüşhane: 5,5       | Hakkâri: -21,7   |

|                   |                 |                  |                  |
|-------------------|-----------------|------------------|------------------|
| Hatay: -60,2      | Iğdır: -17      | Isparta: -34,3   | İstanbul: -25,2  |
| İzmir: -29,1      | K.Maraş: -37,2  | Karabük: -22,4   | Karaman: -46,7   |
| Kars: -9,9        | Kastamonu: -18  | Kayseri: -23,2   | Kırıkkale: -40,7 |
| Kırklareli: -29,9 | Kırşehir: -40,2 | Kilis: -65,6     | Kocaeli: -24,8   |
| Konya: -39,8      | Kütahya: -32,6  | Malatya: -34     | Manisa: -37,1    |
| Mardin: -45,8     | Mersin: -49,4   | Muğla: -25,1     | Muş: -25,9       |
| Nevşehir: -29,8   | Niğde: -32,3    | Ordu: 4          | Osmaniye: -45,5  |
| Rize: -9,8        | Sakarya: -22,8  | Samsun: 2,7      | Siirt: -38,8     |
| Sinop: -4,2       | Sivas: -15,5    | Şanlıurfa: -53,9 | Şırnak: -33,3    |
| Tekirdağ: -41,3   | Tokat: -19,6    | Trabzon: 12,9    | Tunceli: -12,6   |
| Uşak: -26,5       | Van: -28        | Yalova: -34,7    | Yozgat: -34,3    |
| Zonguldak: -16,8  |                 |                  |                  |

2025 yılında Ankara ve Bursa’da yağışların normal değerlerin oldukça altında gerçekleşmesi, her iki kentte de kuraklık riskinin arttığını göstermektedir (MGM, 2025a).

Türkiye’de su kıtlığına karşı geliştirilen ulusal politika çerçevesi, yalnızca arz artırıcı yatırımlara değil; su kalitesinin korunmasına, kirliliğin önlenmesine, havza bazlı yönetime, izleme-denetim sistemlerine ve altyapı yatırımlarının güçlendirilmesine dayandırılmaktadır. Bu kapsamda Ulusal Su Planı’nın temel bileşenleri Şekil 2’de verilmiştir (TOB, 2026).



Şekil 2. Türkiye’nin ulusal su planı (2026-2035) (TOB, 2026).

## Bursa’da Su Kıtlığı Riskinin Bütünleşik Değerlendirilmesi

Bursa’nın su kıtlığı riskinin anlaşılabilmesi için öncelikle ilin coğrafi yapısı, yüzey şekilleri, su kaynakları ve yerleşim alanlarının dağılımı birlikte değerlendirilmelidir. Bursa, Marmara Denizi’nin güneydoğusunda yer almakta; dağlık alanlar, ovalar, göller, akarsular ve kıyı kuşağıyla farklı hidrolojik özellikler göstermektedir (HGM, 2025a; BUÜ, 2026).

Bursa’da dağlık alanlar, ovalar, göller ve kıyı kuşağı birlikte yer almaktadır. Bu yapı, ilin su kaynakları bakımından çeşitlilik göstermesine olanak sağlasa da kentleşme, sanayi, tarım ve turizm baskısının aynı coğrafyada yoğunlaşması su yönetimini daha karmaşık hâle getirmektedir. Bu nedenle Bursa için önerilecek modelde havza koruma, yeraltı suyu kontrolü, baraj yönetimi, tarımsal sulama ve sanayi su kullanımı birlikte ele alınmalıdır (BUÜ, 2026).



Şekil 3. Bursa’nın fiziki haritası (HGM, 2025a).

Bursa’da yağış rejiminin yıllar içindeki değişimi, kuraklık riskinin belirlenmesi açısından temel göstergelerden biridir. (MGM, 2025b; Weather and Climate, 2026a).

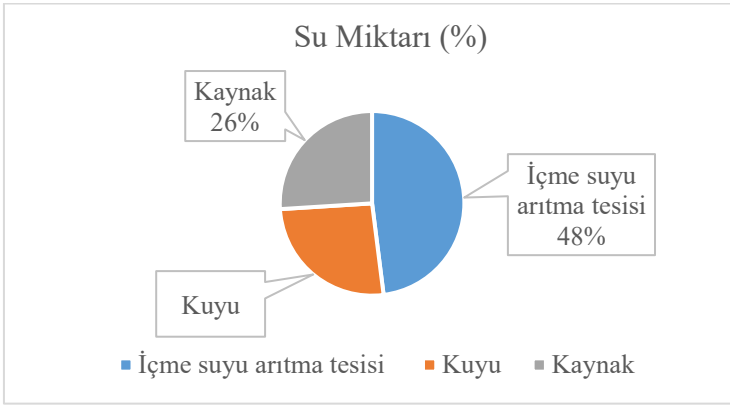
Tablo 3. Bursa'nın yağış miktarları ve uzun yıllar normalleri (UYN) (mm) (MGM, 2025b; Weather and Climate, 2026a).

| Ay                   | UYN          | 2020       | 2021       | 2022       | 2023       | 2024       | 2025       |
|----------------------|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Ocak</b>          | 88,9         | 62         | 288        | 56         | 28         | 132        | 84         |
| <b>Şubat</b>         | 74,9         | 98         | 68         | 111        | 71         | 21         | 32         |
| <b>Mart</b>          | 69,9         | 72         | 101        | 49         | 109        | 66         | 38         |
| <b>Nisan</b>         | 61,8         | 35         | 57         | 34         | 121        | 23         | 37         |
| <b>Mayıs</b>         | 50,0         | 104        | 30         | 26         | 43         | 46         | 29         |
| <b>Haziran</b>       | 35,2         | 65         | 61         | 92         | 49         | 0          | 0          |
| <b>Temmuz</b>        | 22,3         | 0          | 25         | 1          | 8          | 61         | 0          |
| <b>Ağustos</b>       | 17,7         | 0,0        | 0,2        | 51         | 0,3        | 0          | 9          |
| <b>Eylül</b>         | 42,7         | 2          | 8          | 14         | 8          | 43         | 15         |
| <b>Ekim</b>          | 66,0         | 23         | 51         | 16         | 46         | 18         | 70         |
| <b>Kasım</b>         | 77,6         | 88         | 40         | 24         | 248        | 122        | 51         |
| <b>Aralık</b>        | 99,4         | 13         | 94         | 37         | 57         | 83         | 64         |
| <b>Yıllık Toplam</b> | <b>706,4</b> | <b>578</b> | <b>823</b> | <b>511</b> | <b>788</b> | <b>615</b> | <b>429</b> |

Tablo 4. Bursa'nın aylık ortalama sıcaklıkları (2020-2025) ve UYN ile karşılaştırılması (°C) (MGM, 2025b; Weather and Climate, 2026d).

| Ay             | UYN         | 2020        | 2021        | 2022        | 2023        | 2024        | 2025        |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Ocak</b>    | 5,4         | 5,7         | 8,1         | 4,7         | 8,3         | 7,8         | 8,0         |
| <b>Şubat</b>   | 6,5         | 8,8         | 8,3         | 7,4         | 6,6         | 9,9         | 4,8         |
| <b>Mart</b>    | 9,0         | 10,3        | 7,0         | 5,1         | 10,5        | 10,8        | 12,0        |
| <b>Nisan</b>   | 13,0        | 12,6        | 13,0        | 14,7        | 13,2        | 17,3        | 11,9        |
| <b>Mayıs</b>   | 18,1        | 18,5        | 19,4        | 18,7        | 16,8        | 17,1        | 18,3        |
| <b>Haziran</b> | 22,6        | 22,9        | 21,8        | 23,2        | 22,1        | 26,5        | 24,3        |
| <b>Temmuz</b>  | 25,1        | 25,8        | 26,2        | 24,9        | 26,6        | 27,6        | 28,3        |
| <b>Ağustos</b> | 25,2        | 25,5        | 26,4        | 27,1        | 27,4        | 26,8        | 26,4        |
| <b>Eylül</b>   | 20,8        | 23,0        | 20,5        | 21,4        | 22,9        | 22,9        | 22,3        |
| <b>Ekim</b>    | 15,9        | 18,5        | 15,0        | 16,1        | 18,1        | 16,4        | 16,0        |
| <b>Kasım</b>   | 10,7        | 10,4        | 12,8        | 13,4        | 14,2        | 10,9        | 13,3        |
| <b>Aralık</b>  | 7,0         | 11,0        | 9,9         | 10,4        | 10,9        | 9,2         | 7,6         |
| <b>Yıllık</b>  | <b>14,9</b> | <b>16,1</b> | <b>15,7</b> | <b>15,6</b> | <b>16,5</b> | <b>16,9</b> | <b>16,1</b> |

Bursa genelinde içme ve kullanma suyu; içme suyu arıtma tesisleri, kuyular ve doğal kaynaklardan sağlanmaktadır. Kaynak bazında su temin oranları Şekil 4'te gösterilmiştir (ÇŞİDB, 2023).



Şekil 4. Bursa’da içme ve kullanma suyunun kaynak bazında temin oranları (2022) (ÇŞİDB, 2023).

Bursa’nın içme suyu ihtiyacı, başta Doğancı ve Nilüfer barajları olmak üzere çeşitli kaynaklardan karşılanmaktadır. Ancak barajların doluluk oranlarında yıllar arasında görülen dalgalanmalar, iklim değişikliği koşullarında barajlara dayalı su arzının dikkatli yönetilmesi gerektiğini göstermektedir. Bursa’daki barajların yıllık doluluk oranları Tablo 5’te verilmiştir (DSİ, 2025).

Tablo 5. Bursa’daki barajların yıllık doluluk oranları (%) (2020-2024) (DSİ, 2025).

| Baraj Adı    | 2020  | 2021  | 2022  | 2023   | 2024  |
|--------------|-------|-------|-------|--------|-------|
| Boğazköy     | 24,90 | 23,00 | 54,70 | 29,30  | 3,10  |
| Babasultan   | 28,40 | 45,20 | 47,10 | 38,10  | 23,40 |
| Çiçekközü    | -     | -     | 92,20 | 100,00 | 90,40 |
| Gölcük       | -     | -     | 25,00 | 32,20  | 32,20 |
| Çınarcık     | 12,00 | 12,00 | 28,00 | 29,30  | 28,10 |
| Doğancı      | 41,10 | 49,70 | 32,00 | 47,00  | 51,70 |
| Nilüfer      | 30,60 | 82,30 | 36,70 | 56,60  | 10,40 |
| Gölbaşı      | 21,70 | 39,20 | 44,40 | 20,70  | 12,40 |
| Demirtaş     | 36,70 | 33,40 | 29,60 | 5,50   | 23,50 |
| Büyükorhan   | 0,00  | 54,80 | 41,10 | 26,70  | 23,60 |
| Devecikonağı | 48,40 | 75,00 | 93,60 | 48,90  | 48,90 |
| Kayapa       | -     | -     | 84,10 | 98,60  | 23,10 |
| Hasanağa     | 68,90 | 68,90 | 68,90 | 100,00 | 0,00  |

Bursa’da nüfus artışı, su talebini artıran önemli göstergelerden biridir. Nüfus artışıyla birlikte içme suyu ihtiyacı, atıksu oluşumu, altyapı kapasitesi ve kentsel hizmet talebi yükselmektedir. Bursa’nın 2021-2025 dönemine ilişkin nüfus verileri Tablo 6’da verilmiştir (URL-1, t.y.).

Tablo 6. Bursa'nın nüfus verileri (2021–2025) (URL-1, t.y.).

| Yıl  | Toplam Nüfus |
|------|--------------|
| 2025 | 3.263.011    |
| 2024 | 3.238.618    |
| 2023 | 3.214.571    |
| 2022 | 3.194.720    |

Bursa'da şebeke kayıpları, su verimliliği açısından önemli bir sorun alanıdır. İlçeler arasında kayıp-kaçak oranlarında belirgin farklılıklar bulunması, il geneline yönelik tek tip bir müdahale yerine ilçe bazlı önceliklendirme yapılmasını gerekli kılmaktadır (TEMA, 2023; BUSKİ, 2024; Dinç, 2025).

Tablo 7. Bursa'nın ilçelerindeki su kayıp-kaçak oranları karşılaştırılması (2021-2022) (BUSKİ, 2024).

| İLÇELER                             | 2021         | 2022                          | Değişim     | Değerlendirme       |
|-------------------------------------|--------------|-------------------------------|-------------|---------------------|
| <b>Osmangazi, Yıldırım, Nilüfer</b> | %20          | %20                           | 0 puan      | — Sabit             |
| <b>Mudanya</b>                      | %28          | %28,71                        | +0,71 puan  | ↑ Kötüleşme         |
| <b>Gemlik</b>                       | %37          | %33,46                        | -3,54 puan  | ↓ İyileşme          |
| <b>Kestel</b>                       | %29          | %30,99                        | +1,99 puan  | ↑ Kötüleşme         |
| <b>Gürsu</b>                        | %28          | %28,34                        | +0,34 puan  | ↑ Hafif kötüleşme   |
| <b>İnegöl</b>                       | %53          | %53,77                        | +0,77 puan  | ↑ Hafif kötüleşme   |
| <b>Mustafakemalpaşa</b>             | %58          | %57,25                        | -0,75 puan  | ↓ Hafif iyileşme    |
| <b>Karacabey</b>                    | %41          | %39,59                        | -1,41 puan  | ↓ İyileşme          |
| <b>İznik</b>                        | %29          | %37                           | +8 puan     | ↑ Ciddi kötüleşme   |
| <b>Harmancık</b>                    | %43          | %40,52                        | -2,48 puan  | ↓ İyileşme          |
| <b>Orhaneli</b>                     | %52          | %39,62                        | -12,38 puan | ↓ Dramatik iyileşme |
| <b>Orhangazi</b>                    | %54          | %55,01                        | +1,01 puan  | ↑ Hafif kötüleşme   |
| <b>Keles</b>                        | %49          | %26,45                        | -22,55 puan | ↓ Dramatik iyileşme |
| <b>Yenişehir</b>                    | %53          | %55,89                        | +2,89 puan  | ↑ Kötüleşme         |
| <b>Büyükorhan</b>                   | %23          | %20,16                        | -2,84 puan  | ↓ İyileşme          |
| <b>Ort.:</b>                        | <b>%39,8</b> | <b>Ort.:</b><br><b>%37,78</b> |             |                     |



Bursa’da atıksu arıtma altyapısının geri kazanım potansiyeli açısından değerlendirilmesi, su kıtlığıyla mücadelede önemli bir aşama olarak görülmektedir. Mevcut atıksu arıtma kapasitesi, arıtılmış suyun yeniden kullanımı için temel bir altyapı potansiyeli oluşturmaktadır. Bursa’nın atıksu arıtma tesis sayıları, kapasiteleri ve arıtılan atıksu miktarları Tablo 8’de verilmiştir (TÜİK, 2026).

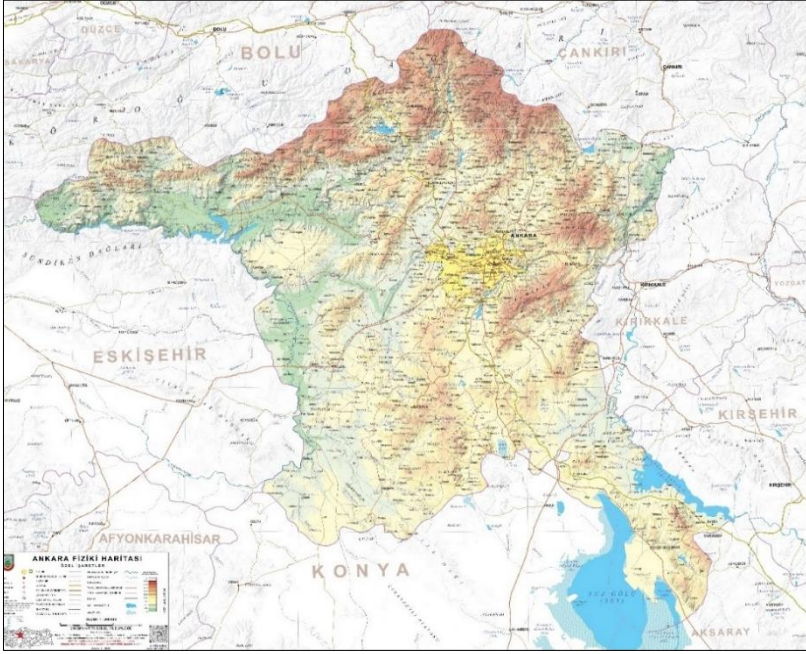
Tablo 8. Bursa’nın atıksu arıtma tesis sayıları, kapasiteleri ve arıtılan atıksu miktarları (TÜİK, 2026).

| <b>Değişkenler / Arıtma Tipi</b>               | <b>Genel Toplam</b> | <b>Fiziksel ve/veya Kimyasal Arıtma</b> | <b>Konvansiyonel Arıtma</b> | <b>Gelişmiş Arıtma</b> |
|------------------------------------------------|---------------------|-----------------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| <b>Toplam Belediye Sayısı</b>                  | 18                  | -                                       | -                           | -                      |
| <b>Toplam Arıtma Tesisi Sayısı</b>             | 47                  | 0                                       | 47                          | 0                      |
| <b>Tesis Kapasitesi (Bin m<sup>3</sup>)</b>    | 302.475             | 0                                       | 302.475                     | 0                      |
| <b>Arıtılan Su Miktarı (Bin m<sup>3</sup>)</b> | 168.626             | 0                                       | 168.626                     | 0                      |

Genel olarak değerlendirildiğinde Bursa’da su kıtlığı riski, yalnızca yağış azalmasına bağlı dönemsel bir sorun olarak görülmemelidir. Yağış rejimindeki düzensizlik, sıcaklık artışı, baraj doluluklarındaki dalgalanma, sanayi ve tarım ağırlıklı su tüketimi, ilçeler arası kayıp-kaçak farkları ve gelişmiş arıtma eksikliği birlikte ele alınmalıdır. Bu nedenle Bursa için geliştirilecek hibrit model; sanayi ve tarımda su verimliliği, ileri arıtma ve geri kazanım, yağmur suyu hasadı, kayıp-kaçak azaltımı, baraj-havza koruma ve sektörel su tahsisinin yeniden düzenlenmesi üzerine kurulmalıdır (ÇŞİDB, 2023; BUSKİ, 2024; TÜİK, 2026).

### **Ankara’da Su Kıtlığı Riskinin Bütünleşik Değerlendirilmesi**

Ankara, İç Anadolu’nun karasal iklim koşullarında yer alan, yazları sıcak ve kurak, kışları soğuk geçen bir büyükşehir niteliğindedir. Kentin su güvenliği; doğal yağış koşullarının sınırlılığı, barajlara bağımlılık, nüfus artışı, geniş kentsel alan, tarımsal sulama baskısı ve uzun mesafeli su iletim sistemleriyle yakından ilişkilidir. Ankara’nın fiziki yapısı Şekil 5’te verilmiştir (HGM, 2025b).



Şekil 5. Ankara'nın fiziki haritası (HGM, 2025b).

Ankara'nın 2020-2025 yılları arasındaki yağış verileri, uzun yıllar normalinin altında seyreden bir eğilimi göstermektedir. Yıllık toplamlar içinde yalnızca 2023 yılının ortalamanın üzerinde gerçekleşmesi, diğer yıllarda ise kurak koşulların belirginleşmesi, Ankara'nın su yönetiminde iklim değişkenliğini dikkate alan bir planlama yaklaşımına ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Ankara'nın yağış miktarları Tablo 9'da verilmiştir (MGM, 2025b; Weather and Climate, 2026b).

Tablo 9. Ankara'nın yağış miktarları (2020-2025) ve uzun yıllar normalleri ile karşılaştırılması (mm) (MGM, 2025b; Weather and Climate, 2026b).

| Ay                   | UYN          | 2020       | 2021       | 2022       | 2023       | 2024       | 2025         |
|----------------------|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|
| Ocak                 | 38,6         | 23         | 66         | 31         | 7          | 51         | 18           |
| Şubat                | 36,6         | 70         | 17         | 42         | 21         | 13         | 17           |
| Mart                 | 46,9         | 23         | 70         | 33         | 68         | 27         | 0,8          |
| Nisan                | 44,5         | 25         | 21         | 3          | 48         | 64         | 101          |
| Mayıs                | 51,0         | 69         | 14         | 12         | 107        | 78         | 63           |
| Haziran              | 40,2         | 105        | 40         | 116        | 90         | 61         | 14           |
| Temmuz               | 14,8         | 5          | 2          | 21         | 1          | 16         | 50           |
| Ağustos              | 14,6         | 0,0        | 17         | 29         | 0          | 5          | 4            |
| Eylül                | 17,9         | 0,2        | 19         | 4          | 28         | 10         | 27           |
| Ekim                 | 33,4         | 30         | 6          | 15         | 2          | 2          | 32           |
| Kasım                | 31,9         | 6          | 52         | 10         | 79         | 17         | 15           |
| Aralık               | 43,2         | 18         | 42         | 24         | 29         | 50         | 25           |
| <b>Yıllık Toplam</b> | <b>413,6</b> | <b>372</b> | <b>363</b> | <b>339</b> | <b>477</b> | <b>392</b> | <b>366,8</b> |

Ankara’da sıcaklık eğilimleri, su talebi ve buharlaşma kayıpları üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Özellikle yaz aylarında sıcaklık artışı, baraj yüzeylerinden buharlaşmayı, tarımsal sulama ihtiyacını ve kentsel yeşil alan sulama talebini artırmaktadır. Ankara’nın aylık ortalama sıcaklıkları Tablo 10’ta verilmiştir (MGM, 2025b; Weather and Climate, 2026c).

Tablo 10. Ankara’nın aylık ortalama sıcaklıkları (2020-2025) ve uzun yıllar normalleri ile karşılaştırılması (°C) (MGM, 2025b; Weather and Climate, 2026c).

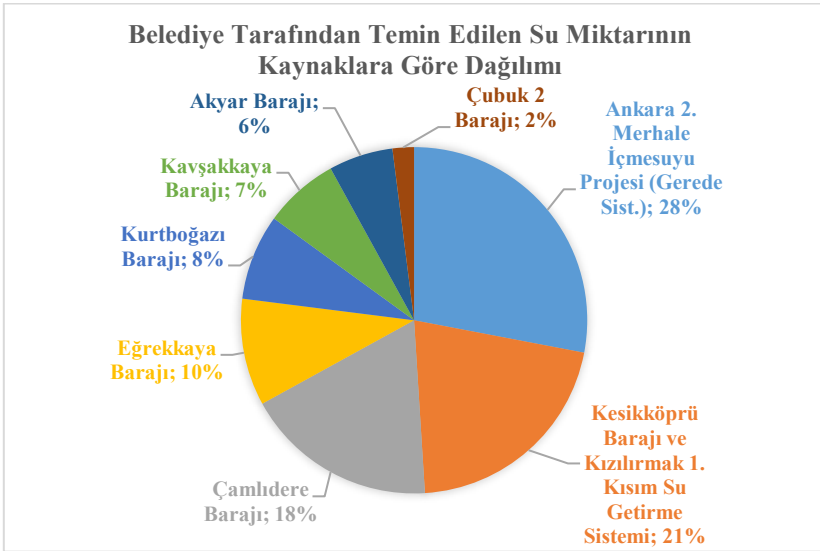
| Ay             | UYN         | 2020        | 2021        | 2022        | 2023        | 2024        | 2025        |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Ocak</b>    | 0,9         | 1,3         | 3,5         | 0,9         | 3,9         | 4,1         | 4,6         |
| <b>Şubat</b>   | 2,7         | 4,2         | 4,5         | 4,0         | 2,8         | 7,0         | 1,5         |
| <b>Mart</b>    | 6,7         | 9,3         | 5,1         | 2,4         | 8,2         | 8,5         | 10,9        |
| <b>Nisan</b>   | 11,5        | 11,7        | 12,3        | 14,1        | 11,0        | 17,0        | 10,6        |
| <b>Mayıs</b>   | 16,5        | 17,1        | 19,2        | 16,6        | 15,8        | 15,7        | 17,0        |
| <b>Haziran</b> | 20,6        | 20,8        | 19,0        | 20,9        | 19,9        | 24,7        | 22,4        |
| <b>Temmuz</b>  | 24,2        | 26,0        | 25,5        | 23,1        | 25,0        | 25,7        | 27,1        |
| <b>Ağustos</b> | 24,3        | 25,3        | 25,6        | 26,2        | 28,3        | 25,7        | 26,0        |
| <b>Eylül</b>   | 19,6        | 23,3        | 18,7        | 20,5        | 21,0        | 21,2        | 19,8        |
| <b>Ekim</b>    | 13,9        | 17,6        | 13,3        | 13,7        | 15,9        | 14,1        | 13,6        |
| <b>Kasım</b>   | 7,3         | 6,8         | 9,3         | 10,0        | 10,7        | 7,6         | 11,0        |
| <b>Aralık</b>  | 2,8         | 6,1         | 4,3         | 6,2         | 6,9         | 4,6         | 4,7         |
| <b>Yıllık</b>  | <b>12,6</b> | <b>14,1</b> | <b>13,4</b> | <b>13,2</b> | <b>14,1</b> | <b>14,7</b> | <b>14,1</b> |

Ankara’da nüfus artışı, su talebinin uzun vadeli seyrini belirleyen temel göstergelerden biridir. Nüfusun artması, içme ve kullanma suyu talebini, atıksu oluşumunu, altyapı kapasitesi ihtiyacını ve kentsel planlama baskısını artırmaktadır. Ankara’nın 2021-2025 dönemi nüfus verileri Tablo 11’de verilmiştir (URL-2, t.y.).

Tablo 11. Ankara’nın nüfus verileri (2021-2025) (URL-2, t.y.).

| Yıl  | Toplam Nüfus |
|------|--------------|
| 2021 | 5.747.325    |
| 2022 | 5.782.285    |
| 2023 | 5.803.482    |
| 2024 | 5.864.049    |
| 2025 | 5.910.320    |

Ankara’da su temininin kaynaklara göre dağılımı, kentin su arz güvenliğinin çok kaynaklı ancak dış sistemlere bağımlı bir yapı taşıdığını göstermektedir. Bu dağılım, Ankara’nın yalnızca yerel barajlara değil, aynı zamanda uzun mesafeli su getirme sistemlerine de dayandığını ortaya koymaktadır. Belediye tarafından temin edilen su miktarının kaynaklara göre dağılımı Şekil 6’da verilmiştir (ÇŞİDB, 2025).



Şekil 6. Ankara’da belediye tarafından temin edilen su miktarının kaynaklara göre dağılımı (ÇŞİDB, 2025).

Ankara’da baraj doluluk oranları, içme suyu arz güvenliği bakımından önemli bir göstergedir. Barajlar arasında doluluk oranlarının farklılaşması, kentin su arz sisteminin çok kaynaklı ve karmaşık bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Ankara’daki barajların yıllık doluluk oranları Tablo 12’de verilmiştir (DSİ, 2025).

Tablo 12. Ankara’daki barajların doluluk oranları (%) (DSİ, 2025).

| Baraj Adı            | 2020   | 2021   | 2022   | 2023   | 2024   |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Hirfanlı             | 30,10  | 19,00  | 0,00   | 0,00   | 0,00   |
| Kesikköprü           | 96,40  | 94,20  | 94,60  | 94,60  | 93,00  |
| Kalecik Uludere      | -      | -      | 10,80  | 2,80   | 2,30   |
| Peçenek (Ş.Koçhisar) | 31,50  | 26,20  | 27,80  | 24,00  | 21,40  |
| Çamlıdere            | 15,90  | 12,60  | 21,90  | 24,90  | 22,40  |
| Eğrekkaya            | 29,00  | 16,70  | 58,80  | 57,70  | 55,50  |
| Kurtboğazi           | 24,50  | 38,10  | 25,80  | 33,50  | 18,00  |
| Kavşakkaya           | 6,20   | 24,30  | 43,50  | 55,10  | 60,30  |
| Akyar                | 28,60  | 6,70   | 35,70  | 46,20  | 42,30  |
| Doğanözü             | 46,20  | 34,70  | 33,90  | 46,50  | 46,70  |
| Çubuk 2              | 33,10  | 21,30  | 21,30  | 35,40  | 61,40  |
| Asartepe             | 37,30  | 12,80  | 3,60   | 2,20   | 0,00   |
| Çubuk 1              | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   |
| Kayaş Bayındır       | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| Gürsöğüt 1           | -      | -      | 35,60  | 58,10  | 65,80  |
| Kargı Barajı ve HES  | -      | -      | 39,20  | 59,90  | 42,40  |
| Gürsöğüt 2           | -      | -      | 24,10  | 47,00  | 21,20  |

Ankara’da su kullanım yapısı incelendiğinde, içme suyu temini yanında sanayi ve tarımsal sulamanın da önemli baskı oluşturduğu görülmektedir. Özellikle tarımsal sulamada salma sulama yönteminin yaygın olması, su verimliliği açısından önemli bir sorun alanı oluşturmaktadır (ÇŞİDB, 2025).

Ankara’da atıksu arıtma altyapısının geri kazanım potansiyelini değerlendirmek amacıyla tesis sayıları, kapasiteleri ve arıtılan atıksu miktarları Tablo 13’te verilmiştir. Kent genelindeki atıksu arıtma altyapısı, arıtılmış suyun yeniden kullanımı için önemli bir potansiyel sunmaktadır (ASKİ, 2024; TÜİK, 2026).

Tablo 13. Ankara’nın atıksu arıtma (TÜİK, 2026).

| <b>Değişkenler / Arıtma Tipi</b>          | <b>Genel Toplam</b> | <b>Fiziksel ve/veya Kimyasal Arıtma</b> | <b>Konvansiyonel Arıtma</b> | <b>Gelişmiş Arıtma</b> | <b>Diğer</b> |
|-------------------------------------------|---------------------|-----------------------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------|
| Toplam Belediye Sayısı                    | 26                  | -                                       | -                           | -                      | -            |
| Toplam Arıtma Tesis Sayısı                | 117                 | -                                       | -                           | -                      | -            |
| Tesis Kapasitesi (Bin m <sup>3</sup> )    | -                   | 730.710                                 | 0                           | 717.961                | 12.749       |
| Arıtılan Su Miktarı (Bin m <sup>3</sup> ) | -                   | 560.183                                 | 0                           | 553.484                | 6.698        |

Genel olarak değerlendirildiğinde, Ankara’da su kıtlığı riski yalnızca baraj hacimleri veya yıllık kaynak potansiyeli üzerinden açıklanamaz. Artan nüfus, kurak iklim koşulları, düzensiz yağış rejimi, uzun mesafeli su temin sistemlerine bağımlılık, yüksek kayıp-kaçak oranı ve tarımsal sulamada verimsiz uygulamalar birlikte ele alınmalıdır. Buna karşılık gelişmiş atıksu arıtma kapasitesi, arıtılmış suyun yeniden kullanımı açısından Ankara için önemli bir fırsat sunmaktadır (ASKİ, 2024; ÇŞİDB, 2025; TÜİK, 2026).

### **Küresel Çözüm Modellerinin Bursa ve Ankara’ya Uygulanabilirliği**

Su kıtlığıyla mücadelede geliştirilen küresel çözüm modelleri, ülkelerin iklim koşulları, mevcut su kaynakları, nüfus baskısı, ekonomik yapı ve altyapı kapasitesine bağlı olarak farklılaşmaktadır. Bu kapsamda Mısır’da deniz suyu arıtımıyla alternatif su kaynaklarının geliştirilmesi, Ürdün’de uzun mesafeli su taşıma ve arz güvenliği projeleriyle sınırlı su kaynaklarının desteklenmesi, Singapur’da Dört Musluk stratejisi ve NEWater uygulamasıyla atıksuyun yeniden kullanılabilir bir kaynağa dönüştürülmesi, Belçika’da sünger şehir ve

yeraltı depolama sistemleriyle yağmur suyunun kent içinde tutulması, Almanya’da ise yağmur suyu hasadı ve teşvik temelli yerel su yönetimiyle bireysel ve kurumsal katılımın artırılması öne çıkmaktadır. Bu örnekler, Bursa ve Ankara için doğrudan aktarılabilecek hazır çözümler olarak değil; su arzını artırma, mevcut kaynakları koruma, atıksuyu yeniden kullanma, yağmur suyunu depolama ve yerel ölçekte su verimliliğini güçlendirme açısından uyarlanabilecek yönetim modelleri olarak değerlendirilmelidir (UN-Water, 2024; Dinç, 2025; Huang vd., 2026; JT, 2026; MSE, 2026).

Mısır’da öne çıkan deniz suyu arıtımı, su arzını artırmaya yönelik güçlü bir alternatif kaynak geliştirme modeli olarak değerlendirilmektedir. Ancak bu yöntemin yüksek enerji ihtiyacı, yatırım maliyeti ve çevresel etkileri, Bursa ve Ankara açısından uygulanabilirliğini sınırlamaktadır. Ankara’nın denize kıyısı bulunmadığından bu model kent için doğrudan uygun değildir. Bursa açısından ise denizle ilişkili konumu nedeniyle teorik olarak değerlendirilebilse de mevcut su yönetimi öncelikleri dikkate alındığında kısa ve orta vadede temel çözüm niteliği taşımamaktadır (Huang vd., 2026; Staff Writer, 2026).

Ürdün’de uygulanan uzun mesafeli su taşıma ve arz güvenliği projeleri, sınırlı su kaynaklarına sahip bölgelerde dış kaynak destekli su temininin önemini göstermektedir. Bu model, özellikle Ankara açısından daha doğrudan karşılık bulmaktadır. Ankara’da Gerede Sistemi ve Kesikköprü-Kızılırmak bağlantısı gibi mevcut su temin yapıları, uzun mesafeli su transferine dayalı arz güvenliği yaklaşımıyla ilişkilendirilebilir. Bursa’da ise bu tür uygulamalar, sürekli bir ana kaynak modeli olmaktan çok, kuraklık dönemlerinde destekleyici bir seçenek olarak değerlendirilebilir (ASKİ, 2024; JT, 2025; 2026).

Singapur’un Dört Musluk stratejisi ve NEWater uygulaması, su kaynaklarının çeşitlendirilmesi ve atıksuyun yeniden kullanılması bakımından dikkat çekici bir örnek oluşturmaktadır. Bu yaklaşım, Bursa ve Ankara için yüksek uyarlanabilirlik potansiyeline sahiptir. Bursa’da sanayi yoğunluğu ve organize sanayi bölgelerinin varlığı, artırılmış atıksuyun endüstriyel kullanım açısından değerlendirilmesine imkân tanımaktadır. Ankara’da ise gelişmiş atıksu arıtma kapasitesi, artırılmış suyun kentsel yeşil alanlar, sanayi kullanımı ve uygun tarımsal faaliyetlerde değerlendirilmesi açısından önemli bir altyapı potansiyeli sunmaktadır (MSE, 2026; TÜİK, 2026).

Belçika’da uygulanan sünger şehir ve yeraltı depolama yaklaşımları, yağmur suyunun kent içinde tutulması ve yüzey akışının azaltılması bakımından önemli bir modeldir. Bursa’da sanayi alanları, yoğun kentleşme bölgeleri ve büyük çatı yüzeylerine sahip yapılar, bu yaklaşımın değerlendirilebileceği alanlar olarak öne çıkmaktadır. Ankara’da ise geniş kamu alanları, üniversite kampüsleri, parklar ve yeni gelişme bölgeleri, yağmur suyunun depolanması ve toprağa sızdırılması açısından uygun uygulama alanları sunmaktadır. Bu yönüyle Belçika örneği, her

iki kentte de kentsel su döngüsünün güçlendirilmesi bakımından anlamlı bir karşılaştırma zemini oluşturmaktadır (Dinç, 2025; MGM, 2025a; MGM, 2025b).

Almanya'daki yağmur suyu hasadı ve teşvik temelli yerel su yönetimi modeli, su yönetiminde merkezi altyapı yatırımlarının yanında bireysel ve kurumsal katılımın da önemli olduğunu göstermektedir. Bu model, Bursa'da organize sanayi bölgeleri, kamu binaları, konut alanları ve tarımsal işletmeler açısından değerlendirilebilir. Ankara'da ise kamu kurumları, kampüsler, park alanları, yeni konut bölgeleri ve kırsal mahalleler bu yaklaşımın uygulanabileceği alanlar arasında yer almaktadır. Böylece Almanya örneği, su tasarrufunun yalnızca teknik altyapı yatırımlarıyla değil, aynı zamanda teşvik mekanizmaları ve yerel katılımı desteklenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Dinç, 2025; TOB, 2026).

Genel değerlendirme yapıldığında, Bursa ve Ankara'nın su kıtlığı sorunlarının aynı nitelikte olmadığı görülmektedir. Bursa'da sanayi ve tarım ağırlıklı su kullanımı, yağış rejimindeki düzensizlikler, baraj doluluk oranlarındaki dalgalanma ve geri kazanım altyapısının geliştirilmesi ihtiyacı öne çıkmaktadır. Ankara'da ise kurak iklim koşulları, yüksek nüfus baskısı, uzun mesafeli su temin sistemlerine bağımlılık, kayıp-kaçak sorunu ve tarımsal sulama baskısı daha belirleyici görünmektedir. Bu nedenle küresel çözüm modellerinin her iki şehir için aynı biçimde değil, farklı önceliklerle değerlendirilmesi gerekmektedir.

Tablo 14. Küresel çözüm modellerinin Bursa ve Ankara'ya uygulanabilirliği

| Ülke     | Ülkede uygulanan temel çözüm                                  | Bursa için uygulanabilirlik                                                                   | Ankara için uygulanabilirlik                                                   |
|----------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Mısır    | Deniz suyu arıtımı ve alternatif su kaynağı geliştirme        | Doğrudan öncelikli değildir; uzun vadede bölgesel destek seçeneği olarak değerlendirilebilir. | Denize kıyısı bulunmadığı için doğrudan uygun değildir.                        |
| Ürdün    | Deniz suyu arıtımı ve uzun mesafeli temiz su taşıma           | Olağanüstü kuraklık dönemlerinde ikincil destek seçeneği olabilir.                            | Mevcut uzun mesafeli su temin sistemleriyle ilişkilendirilebilir.              |
| Singapur | Dört Musluk stratejisi, NEWater ve atıksu geri kazanımı       | Sanayi, yeşil alan, temizlik ve uygun tarımsal kullanımda yüksek uygulanabilirlik taşır.      | Gelişmiş arıtma altyapısı nedeniyle yüksek uygulanabilirlik taşır.             |
| Belçika  | Yeraltı depolama, geçirgen yüzey ve sünger şehir uygulamaları | Kentleşme, sanayi alanları ve yüzey akışı nedeniyle uygulanabilir.                            | Ani yağışların depolanması ve yeraltı suyu beslenmesi açısından uygulanabilir. |
| Almanya  | Yağmur suyu hasadı ve teşvik                                  | OSB'ler, konutlar, kamu binaları ve tarımsal                                                  | Kamu kurumları, kampüsler, yeni yerleşimler ve park                            |

|  |                           |                             |                            |
|--|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
|  | temelli yerel su yönetimi | işletmelerde uygulanabilir. | alanlarında uygulanabilir. |
|--|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|

Bursa ve Ankara için yapılan değerlendirme, küresel çözüm modellerinin uygulanabilirliğinin şehirlerin yerel su sorunlarına göre değiştiğini göstermektedir. Bursa’da sanayi su verimliliği, tarımsal sulama dönüşümü, yağmur suyu hasadı ve atıksu geri kazanımı daha güçlü karşılık bulurken; Ankara’da kayıp-kaçak azaltımı, arıtılmış atıksuyun yeniden kullanımı, uzun mesafeli su temin sistemlerinin sürdürülebilirliği ve kentsel su tutma uygulamaları daha belirgin hâle gelmektedir. Bu farklılık, iki şehir için ortak bir su yönetimi çerçevesi kurulabileceğini; ancak uygulama ağırlıklarının kentlerin iklim, altyapı, nüfus ve sektörel kullanım özelliklerine göre değişmesi gerektiğini göstermektedir.

Tablo 15. Bursa ve Ankara için öncelikli hibrit çözüm bileşenleri

| <b>Çözüm bileşeni</b>      | <b>Bursa önceliği</b> | <b>Ankara önceliği</b> | <b>Temel uygulama alanı</b>                                |
|----------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------------------------------------------|
| Kayıp-kaçak azaltımı       | Yüksek                | Çok yüksek             | Şebeke yenileme, basınç yönetimi ve akıllı sayaçlar        |
| Atıksu geri kazanımı       | Yüksek                | Çok yüksek             | Sanayi, yeşil alan, tarım ve temizlik hizmetleri           |
| Yağmur suyu hasadı         | Çok yüksek            | Yüksek                 | Kamu binaları, OSB’ler, konutlar ve kampüsler              |
| Sünger şehir uygulamaları  | Yüksek                | Yüksek                 | Geçirgen yüzeyler, yeşil altyapı ve yeraltı depolama       |
| Tarımsal sulama dönüşümü   | Çok yüksek            | Çok yüksek             | Damla sulama, yağmurlama sulama ve ürün deseni düzenlemesi |
| Sanayi su verimliliği      | Çok yüksek            | Orta-yüksek            | Kapalı devre sistemler ve proses suyu geri kazanımı        |
| Uzun mesafeli su transferi | Düşük-orta            | Yüksek                 | Acil dönem ve arz güvenliği desteği                        |
| Deniz suyu arıtımı         | Düşük                 | Uygun değil            | Bursa için uzun vadeli bölgesel destek seçeneği            |



## Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, su kıtlığı riski Ankara ve Bursa örnekleri üzerinden karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş; her iki kentin iklim koşulları, yağış rejimi, sıcaklık eğilimleri, nüfus artışı, baraj doluluk oranları, su temin kaynakları, kayıp-kaçak düzeyleri, sektörel su kullanımı ve atıksu arıtma altyapısı birlikte ele alınmıştır. Yapılan değerlendirmeler, su kıtlığının yalnızca yağış azlığı veya baraj hacimleriyle açıklanamayacağını; kentleşme baskısı, tarımsal ve endüstriyel su tüketimi, altyapı kayıpları, arıtılmış suyun yeniden kullanım düzeyi ve havza koruma politikalarıyla birlikte bütüncül biçimde değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu nedenle Ankara ve Bursa için tek yönlü arz artırıcı çözümler yerine, su talebini azaltan, mevcut kaynakları koruyan, suyu yeniden kullanan ve yağmur suyunu kent içinde tutan bütünlük bir yönetim anlayışının benimsenmesi gerekmektedir.

Bursa özelinde su kıtlığı riski, yağış rejimindeki düzensizlik, sıcaklık artışı, baraj doluluk oranlarındaki dalgalanma, sanayi ve tarım ağırlıklı su kullanımı, yeraltı suyu üzerindeki baskı ve ilçeler arasında farklılaşan kayıp-kaçak oranlarıyla ilişkili olarak ortaya çıkmaktadır. Kentin su yönetimi açısından en önemli sorun alanlarından biri, mevcut su kaynaklarının yoğun sanayi, tarım ve kentsel kullanım baskısı altında bulunmasıdır. Bu nedenle Bursa'da su kıtlığıyla mücadelede sanayi su verimliliğinin artırılması, organize sanayi bölgelerinde arıtılmış atıksu kullanımının yaygınlaştırılması, tarımsal sulamada basınçlı sistemlere geçilmesi, yağmur suyu hasadının kamu binaları, sanayi tesisleri ve konut alanlarında teşvik edilmesi öncelikli görülmektedir. Ayrıca baraj havzalarının korunması, yeraltı suyu kullanımının denetlenmesi ve sektörel su tahsislerinin su varlığına göre yeniden düzenlenmesi Bursa için temel politika alanları arasında değerlendirilmelidir.

Ankara'da ise su kıtlığı riski daha çok kurak iklim koşulları, sınırlı yerel su potansiyeli, artan nüfus, yüksek kentsel su talebi, tarımsal sulama baskısı ve uzun mesafeli su temin sistemlerine bağımlılık üzerinden belirginleşmektedir. Kentin su arz güvenliği, yalnızca baraj doluluk oranlarına bağlı olarak değil, Gerede Sistemi ve Kesikköprü-Kızılırmak bağlantısı gibi stratejik su temin yapılarının sürdürülebilirliğiyle birlikte ele alınmalıdır. Bununla birlikte, uzun mesafeli su transferinin tek başına kalıcı çözüm olarak görülmemesi; kayıp-kaçak azaltımı, şebeke yenileme, basınç yönetimi, arıtılmış atıksuyun yeniden kullanımı ve tarımsal sulamada verimlilik uygulamalarıyla desteklenmesi gerekmektedir. Ankara'da mevcut gelişmiş atıksu arıtma kapasitesi, park-bahçe sulaması, sanayi kullanımı, tarımsal sulama ve yeraltı suyu besleme uygulamaları için önemli bir potansiyel oluşturmaktadır.

Küresel çözüm modellerinin incelenmesi, farklı ülkelerde geliştirilen uygulamaların yerel koşullara göre biçimlendiğini göstermektedir. Mısır'da deniz suyu arıtımı, Ürdün'de uzun mesafeli su taşıma ve arz güvenliği projeleri,

Singapur'da Dört Musluk stratejisi ve NEWater uygulaması, Belçika'da sünger şehir ve yeraltı depolama sistemleri, Almanya'da ise yağmur suyu hasadı ve teşvik temelli yerel su yönetimi öne çıkmakla birlikte Bursa ve Ankara'ya doğrudan aktarılması uygun olmamaktadır. Bunun yerine, her uygulamanın temel ilkesi yerel koşullara göre uyarlanmalıdır. Bu kapsamda Singapur'un atıksu geri kazanım yaklaşımı, Belçika'nın kent içinde su tutma uygulamaları ve Almanya'nın yağmur suyu hasadı ile teşvik temelli yönetim modeli her iki şehir için yüksek uyarlanabilirlik taşımaktadır. Ürdün örneği özellikle Ankara'nın uzun mesafeli su temin yapısıyla ilişkilendirilebilirken, Mısır'daki deniz suyu arıtımı modeli Ankara için uygun görülmemekte, Bursa için ise ancak uzun vadeli ve bölgesel ölçekte sınırlı bir destek seçeneği olarak değerlendirilebilmektedir.

Bu değerlendirmeler doğrultusunda Bursa ve Ankara için ortak ilkeleri benzer, ancak uygulama öncelikleri farklılaşan hibrit bir su yönetimi modeli önerilmektedir. Bursa'da modelin ağırlık merkezi sanayi su verimliliği, tarımsal sulama dönüşümü, yağmur suyu hasadı, atıksu geri kazanımı ve baraj-havza koruma politikaları üzerine kurulmalıdır. Ankara'da ise kayıp-kaçak azaltımı, arıtılmış atıksuyun yeniden kullanımı, uzun mesafeli su temin sistemlerinin risk yönetimi, tarımsal sulamada verimlilik ve kentsel su tutma uygulamaları öncelikli bileşenler olarak ele alınmalıdır. Her iki şehirde de çözüm yaklaşımı yalnızca yeni kaynak arayışına indirgenmemeli; mevcut suyun daha verimli kullanılması, kayıpların azaltılması, suyun tekrar kullanılması ve doğal-kentsel su döngüsünün güçlendirilmesi temel hedef olarak belirlenmelidir.

Uygulama düzeyinde öncelikle şebeke kayıplarının azaltılmasına yönelik ilçe ve bölge bazlı izleme sistemleri kurulmalı, basınç yönetimi yaygınlaştırılmalı, akıllı sayaç uygulamaları artırılmalı ve kaçak tespit çalışmaları düzenli hâle getirilmelidir. Atıksu geri kazanımı, yalnızca arıtma tesisi kapasitesi üzerinden değil, arıtılmış suyun hangi sektörlerde, hangi kalite standardıyla ve hangi dağıtım altyapısıyla kullanılacağı üzerinden planlanmalıdır. Sanayi tesislerinde proses suyu geri kazanımı, kapalı devre sistemler ve su ayak izi denetimleri teşvik edilmeli; tarımsal alanlarda ise damla ve yağmurlama sulama sistemleri yaygınlaştırılarak su tüketimi yüksek ürün desenleri yeniden değerlendirilmelidir. Yağmur suyu hasadı ve sünger şehir uygulamaları, yeni imar alanlarında planlama koşulu hâline getirilmeli; mevcut kentsel dokuda ise kamu binaları, üniversite kampüsleri, organize sanayi bölgeleri, parklar ve büyük çatı yüzeyine sahip yapılar öncelikli uygulama alanları olarak belirlenmelidir.

Sonuç olarak, Ankara ve Bursa'da su kıtlığıyla mücadele, yalnızca dönemsel kuraklık koşullarına karşı geliştirilecek geçici önlemlerle sınırlı tutulmamalıdır. İklim değişikliğinin yağış rejimi, sıcaklık artışı, buharlaşma kayıpları ve su talebi üzerindeki etkileri dikkate alınarak uzun vadeli, esnek ve uyarlanabilir bir su yönetimi yaklaşımı geliştirilmelidir. Bu yaklaşımda su; tüketilen ve uzak kaynaklardan getirilen bir unsur olarak değil, korunması, yeniden kullanılması,

kent içinde tutulması ve adil biçimde yönetilmesi gereken stratejik bir değer olarak ele alınmalıdır. Ankara ve Bursa için önerilen hibrit modelin başarılı olabilmesi, teknik altyapı yatırımlarının yanı sıra kurumsal koordinasyonun güçlendirilmesine, yerel yönetimlerin uygulama kapasitesinin artırılmasına, sektörel su kullanımının denetlenmesine ve toplumun su verimliliği sürecine aktif biçimde dâhil edilmesine bağlıdır. Böyle bir bütünleşik yaklaşım, her iki kentin su kıtlığına karşı dirençliliğini artıracak ve uzun vadeli su güvenliğinin sağlanmasına katkı sunacaktır.

## Kaynakça

- Ankara Su ve Kanalizasyon İdaresi (ASKİ). (2024). 2025-2029 stratejik planı. <https://www.aski.gov.tr/Yukle/Dosya/faaliyetperformans/2025-2029%20stratejikPlan.pdf>
- Aydın, O., Ünal, Ü. E., Duman, N., Çiçek, İ., & Türkoğlu, N. (2017). Türkiye’de su kıtlığının mekânsal ölçekte değerlendirilmesi. *Türk Coğrafya Dergisi*, 68, 11-18.
- Budak, Ç. B. (2025). Su Savaşları ve Türkiye’nin Sınır Aşan Sular Bağlamında Su Krizi Durumlarının Değerlendirilmesi. *Avrasya Dosyası*, 15(2), 1-16.
- Bursa Uludağ Üniversitesi (BUÜ) (2026). Bursa. Orhangazi MeslekYüksekokulu. <https://www.uludag.edu.tr/orhangazi/bursa-30834>
- Bursa Su ve Kanalizasyon İdaresi (BUSKİ). (2024). 2024 yılı performans programı. Bursa Büyükşehir Belediyesi. [https://www.buski.gov.tr/files/performance\\_programs/67f8bdfd0c958.pdf](https://www.buski.gov.tr/files/performance_programs/67f8bdfd0c958.pdf)
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB). (2023). Bursa İli 2022 Yılı Çevre Durum Raporu. [https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/bursa\\_cdr2022-20230914130940.pdf](https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/bursa_cdr2022-20230914130940.pdf)
- ÇŞİDB. (2025). Ankara İli 2024 Yılı Çevre Durum Raporu.
- Dinç, O. (2025, December 10). Bremen (Almanya) – Yağmur suyuyla su tasarrufu: Akıllı teşviklerle sürdürülebilirlik. <https://okandinc.com/2025/12/10/bremen-almanya-yagmur-suyuyla-su-tasarrufu-akilli-tesviklerle-surdurulebilirlik/>
- Devlet Su İşleri (DSİ). (2025). Havzalara göre yıllık ortalama yüzeysuyu su potansiyeli, 2013-2024. <https://www.dsi.gov.tr/Sayfa/Detay/2186>
- Harita Genel Müdürlüğü (HGM). (2025a). Bursa Fiziki İl Haritası [Harita]. Millî Savunma Bakanlığı. <https://www.harita.gov.tr/urun/bursa-fiziki-il-haritasi/430>
- HGM (2025b). Ankara fiziki il haritası [Harita]. <https://www.harita.gov.tr/urun/ankara-fiziki-il-haritasi/458>
- Huang, P., Mang, J., & Niu, R. (2026, March 31). 优化水资源利用推进可持续发展 (国际视点) - 埃及、韩国和比利时探索加强水治理 [Optimizing water resource utilization and promoting sustainable development: Egypt, South Korea and Belgium explore strengthening water governance]. People’s Daily. [https://www.waterinfo.com.cn/xsyj/tszs/202604/t20260408\\_37890.html](https://www.waterinfo.com.cn/xsyj/tszs/202604/t20260408_37890.html)

- Jordan Times (JT). (2025, September 30). 2MW solar venture launched to power Disi water project. The Jordan Times. <https://jordantimes.com/news/business/2mw-solar-venture-launched-to-power-disi-water-project>
- JT. (2026, April 21). Gov't signs technical, legal agreement for National Carrier Project. The Jordan Times. <https://jordantimes.com/news/local/govt-signs-technical-legal-agreement-for-national-carrier-project>
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM). (2025a). 2025 yılı yağış değerlendirmesi. <https://www.mgm.gov.tr/FILES/arastirma/yagis-degerlendirme/2025yagisdegerlendirmesi.pdf>
- MGM (2025b). Resmi İklim İstatistikleri: İllerimize Ait Genel İstatistik Verileri. <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx>, 01.05.2026.
- Ministry of Sustainability and the Environment (MSE). (2026, May 12). Water. Government of Singapore. <https://www.mse.gov.sg/policies/water/>
- Staff Writer. (2026, March 17). Egypt to offer seawater desalination plants to private sector for operation, maintenance. Daily News Egypt. ZAWYA. <https://www.zawya.com/en/projects/utilities/egypt-to-offer-seawater-desalination-plants-to-private-sector-for-operation-maintenance-rqeykpnv>
- Türkiye Erozyonla Mücadele, Ağaçlandırma ve Doğal Varlıkları Koruma Vakfı (TEMA). (2023). Su varlıklarında kayıp kaçak oranları. <https://sutema.org/su-varliklarinda-kayip-kacak-oranlari>
- Tarım ve Orman Bakanlığı (TOB). (2026). Ulusal Su Planı (2026-2035). Resmî Gazete (Sayı: 33196). <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2026/03/20260314-4.pdf>
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2026). Belediye İçme ve Kullanma Suyu Şebekesi, Tesis ve Arıtma İstatistikleri.
- UN-Water (2024). Water Scarcity. UN-Water Facts. <https://www.unwater.org/water-facts/water-scarcity>
- URL-1. (t.y.). <https://www.nufusune.com/bursa-nufusu>, Erişim: 05.05.2026.
- URL-2. (t.y.). <https://www.nufusune.com/ANKARA-nufusu>, Erişim: 07.05.2026.
- Weather and Climate (2026a). Bursa, Türkiye Geçmiş İklim Verileri. [https://www.weatherandclimate.eu/tr/history/17116\\_2](https://www.weatherandclimate.eu/tr/history/17116_2)
- Weather and Climate (2026b). Aylara ve yıllara göre ortalama sıcaklık ve yağış: Ankara. [https://www.weatherandclimate.eu/tr/history/17130\\_2](https://www.weatherandclimate.eu/tr/history/17130_2)
- Weather and Climate (2026c). Historical Weather Data – Turkey / Ankara (ID: 17130). <https://www.weatherandclimate.eu/tr/history/17130>

Weather and Climate (2026d). Ortalama aylık ve yıllık hava sıcaklıkları içinde Bursa. <https://www.weatherandclimate.eu/tr/history/17116>

WWF-Türkiye (2023). Dünya Su Günü. <https://www.wwf.org.tr/?13200/dunyasugunu>

WWF-Türkiye (2026). Türkiye’de su kaynaklarının güncel durumu. [https://www.wwf.org.tr/kesfet/tatli\\_su/turkiyede\\_su\\_kaynaklarinin\\_guncel\\_durumu/](https://www.wwf.org.tr/kesfet/tatli_su/turkiyede_su_kaynaklarinin_guncel_durumu/)





## *BÖLÜM 13*



# Su Kıtlığıyla Mücadelede Sürdürülebilir Çözüm Modelleri: Ülke Uygulamaları Üzerinden Karşılaştırmalı Bir İnceleme

*Ahmet Emir Köse<sup>1</sup> & Salim Serkan Nas<sup>2</sup> &  
Sadullah Baydaroglu<sup>3</sup>*

## Giriş

Su, tarih boyunca yerleşimlerin kurulması, üretim ilişkilerinin gelişmesi ve toplumsal refahın şekillenmesinde belirleyici bir kaynak olmuştur. Nehirler, göller ve verimli ovalar çevresinde gelişen medeniyetler, suyun yalnızca yaşamsal ihtiyaçlar için değil; tarım, ticaret, ulaşım, enerji, güvenlik ve ekonomik kalkınma açısından da stratejik önem taşıdığını göstermektedir. Günümüzde ise su, ekosistemlerin sürekliliği, gıda güvenliği ve uluslararası ilişkiler üzerinde doğrudan etkili kritik bir kaynak hâline gelmiştir. Buna karşın, dünya yüzeyinin büyük bölümü sularla kaplı olsa da kullanılabilir tatlı su miktarı oldukça sınırlıdır. Tatlı suyun önemli kısmının buzullarda ve yeraltı sularında bulunması, insanların doğrudan yararlanabildiği yüzey sularının payını düşürmektedir. Nüfus artışı, kentleşme, sanayileşme, tarımsal üretim baskısı, kirlilik ve iklim değişikliğine bağlı kuraklık süreçleri ise mevcut tatlı su kaynakları üzerindeki baskıyı giderek artırmaktadır (WSS, 2019; Doğan, 2023; UN-Water, 2024).

Su kıtlığı, yalnızca yağış azalmasıyla açıklanabilecek dar kapsamlı bir çevre sorunu değildir; fiziksel su yetersizliği, ekonomik erişim güçlükleri, altyapı eksiklikleri, verimsiz kullanım, kirlilik, plansız kentleşme ve yönetim sorunları bu krizin temel bileşenleri arasında yer almaktadır. Bu durum güvenli içme suyuna erişimin zorlaşması, tarımsal verimliliğin düşmesi, gıda fiyatlarının artması, halk sağlığı sorunları, ekonomik kayıplar, ekosistem bozulmaları ve göç hareketleri gibi çok yönlü sonuçlar doğurabilmektedir. Ülkelerin coğrafi,

---

<sup>1</sup> . Phd. Student, Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 29100 Gümüşhane, Türkiye.

ORCID:0000-0003-3890-5721

<sup>2</sup> Prof. Dr., Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 29100 Gümüşhane, Türkiye. ORCID:0000-0001-9054-4674

<sup>3</sup> Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 29100 Gümüşhane, Türkiye. ORCID:0009-0008-5795-5381

iklimsel, ekonomik ve yönetsel koşulları farklılaştığından, su kıtlığıyla mücadelede tek tip bir çözüm modeli yeterli olmamaktadır. Bu kapsamda deniz suyu arıtımı, atıksuyun yeniden kullanımı, yağmur suyu hasadı, geçirgen yüzey uygulamaları, yeraltı depolama sistemleri, su taşıma projeleri, akıllı sulama teknikleri ve bütünlük su yönetimi yaklaşımları sürdürülebilir çözüm modelleri arasında öne çıkmaktadır. Bu çalışmada Mısır, Ürdün, Singapur, Belçika ve Almanya örnekleri üzerinden su kıtlığına yönelik ülke uygulamaları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmekte; suyun değeri, su hakkı, su kaynaklarının durumu, su ayak izi, su tasarrufu ve su kirliliği gibi temel kavramlar sürdürülebilir su yönetimi çerçevesinde ele alınmaktadır (UNESCO, 2021; UN-Water, 2024; Dinç, 2025; MSE, 2025; UNICEF vd., 2025; Huan vd., 2026).

### Dünyada Suyun Durumu

Su, yaşamın devamlılığı için vazgeçilmez bir kaynak olup insan yaşamından tarımsal üretime, sanayiden enerjiye ve ekosistem döngülerine kadar birçok alanda temel işleve sahiptir. Dünya ‘mavi gezegen’ olarak tanımlansa da suyun büyük bölümü tuzlu sulardan oluştuğu için kullanılabilir tatlı su kaynakları oldukça sınırlıdır. Dünya yüzeyinin yaklaşık %71’i suyla kaplı olmasına rağmen bunun yalnızca %2,5’i tatlı sudur. Tatlı suyun önemli kısmının buzullar, kalıcı kar örtüleri ve yeraltı sularında bulunması, su kıtlığı tartışmalarında toplam su miktarından çok erişilebilir tatlı su kaynaklarına odaklanılması gerektiğini göstermektedir (WSS, 2019).

Tablo 1. Dünyadaki suyun durumu (WSS, 2019).

| Su Türü                           | Su Hacmi (km <sup>3</sup> ) | Toplam Su İçindeki Payı | Açıklama                                          |
|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------|
| Okyanuslar, Denizler ve Körfezler | ~1,338,000,000              | %96.54                  | İnsan tüketimine doğrudan uygun değildir.         |
| Buzullar ve Kalıcı Karlar         | ~24,064,000                 | %1.74                   | Kilitli durumda, erişilemez.                      |
| Yeraltı Suları                    | ~23,400,000                 | %1.69                   | Erişilebilir kısmı sınırlıdır.                    |
| Göller                            | ~176,400                    | %0.013                  | Yüzey suyunun büyük kısmıdır.                     |
| Toprak Nemi                       | ~16,500                     | %0.001                  | Bitkiler için hayati öneme sahiptir.              |
| Atmosfer                          | ~12,900                     | %0.001                  | Yağışların kaynağıdır.                            |
| Nehirler                          | ~2,120                      | %0.0002                 | En erişilebilir ancak en az miktardaki kaynaktır. |

Su kaynakları kıtalar arasında dengeli dağılmadığından, toplam su potansiyeli yüksek olan bölgelerde bile nüfus yoğunluğu, iklim koşulları ve altyapı kapasitesine bağlı olarak su stresi görülebilmektedir. Güney Amerika kişi başına düşen su miktarı bakımından avantajlı iken, Asya ve Afrika’da nüfus baskısı ve bölgesel kuraklıklar suya erişimi daha sorunlu hâle getirmektedir (Kirkland, 2023; Liu vd., 2025).

### **Su Kıtlığının Nedenleri ve Sonuçları**

Su kıtlığı, mevcut su miktarının insan, ekosistem, tarım, sanayi ve toplumsal ihtiyaçları karşılamada yetersiz kaldığı çok boyutlu bir çevresel sorundur. Bu sorun yalnızca fiziksel su azlığıyla değil; suya erişim, su kalitesi, altyapı kapasitesi, ekonomik koşullar ve yönetim politikalarıyla da ilişkilidir. Su kıtlığı fiziksel ve ekonomik su kıtlığı olarak ikiye ayrılmaktadır. Fiziksel su kıtlığı mevcut kaynakların talebi karşılayamamasıyla, ekonomik su kıtlığı ise kaynak bulunsa bile altyapı, finansman, teknoloji veya kurumsal kapasite eksiklikleri nedeniyle temiz suyun topluma ulaştırılamamasıyla ortaya çıkmaktadır (Gezer ve Erdem, 2018; Ekopak, 2024; Liu vd., 2025).

Kuraklık, iklim değişikliği ve tarımsal su kullanımı, fiziksel su kıtlığının başlıca nedenleri arasındadır. Yağış rejimindeki düzensizlikler, sıcaklık artışı, buharlaşma ve verimsiz sulama uygulamaları, yüzey ve yeraltı su kaynakları üzerindeki baskıyı artırmaktadır. Endüstriyel kirlilik, hızlı şehirleşme ve altyapı kayıpları da kullanılabilir su miktarını azaltmaktadır. Sanayi atıkları su kalitesini bozarken, plansız kentleşme ve eskiyen şebekeler su talebi ile su arzı arasındaki dengenin bozulmasına neden olmaktadır (Başaran, 2022; Lai, 2022; AOSE, 2024).

Su kıtlığı; tarımsal üretimde verim kaybına, hidrolojik kuraklığın derinleşmesine, sulak alanların azalmasına ve biyolojik çeşitliliğin zayıflamasına yol açabilmektedir. Bu durum, su kıtlığının gıda güvenliği ve ekosistem sürekliliği açısından kritik bir sorun olduğunu göstermektedir. Su kıtlığı, halk sağlığı ve sosyoekonomik yapı üzerinde de ciddi etkiler oluşturmaktadır. Temiz suya erişimin sınırlanması hastalık riskini artırırken, tarımsal üretimdeki düşüş gıda fiyatları, gelir kaybı, işsizlik, göç ve toplumsal kırılganlık gibi sorunları beraberinde getirmektedir (UN-Water, 2024; UNICEF vd., 2025).

Tablo 2. Dünyadaki su kıtlığı ve nüfus oranları (Liu vd., 2025).

| <b>Parametre</b>    | <b>Yıllık Bazda</b>                                         | <b>Mevsimsel Bazda (en az 1 ay)</b>         |
|---------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| <b>Karasal Alan</b> | Dünya karasal alanının %34'ü (Antarktika ve Grönland hariç) | Dünya karasal alanının %22-26'sı            |
| <b>Nüfus</b>        | Dünya nüfusunun %58-64'ü (yaklaşık 4,6-5,1 milyar)          | Dünya nüfusunun %80'i (yaklaşık 5,9 milyar) |

Su kıtlığı, birbirinden bağımsız görünen birçok alanı aynı anda etkileyen zincirleme sonuçlar doğurmaktadır. Güvenli suya erişimin azalması halk sağlığını tehdit ederken, tarımsal üretimdeki düşüş gıda güvenliği sorunlarını artırmaktadır.

Tablo 3. Su kıtlığının sonuçları (UN-Water, 2024).

| Etki Alanı     | Etki Türü                                                |
|----------------|----------------------------------------------------------|
| İnsan sağlığı  | Yetersiz hijyen, hastalıkların artması                   |
| Gıda güvenliği | Tarımsal üretim düşüyor, açlık riski artıyor             |
| Ekonomi        | Üretim duruyor, işsizlik artıyor                         |
| Göç            | Su göçü başlıyor, insanlar su buldukları yerlere taşıyor |
| Çatışma        | Su kaynakları için savaşlar çıkıyor                      |
| Ekosistem      | Sulak alanlar kuruyor, biyoçeşitlilik yok oluyor         |

Ekonomik faaliyetlerin suya bağımlı olması nedeniyle üretim kayıpları ve istihdam sorunları ortaya çıkmakta; su kaynaklarının azalması ise bazı bölgelerde göç ve kaynak paylaşımı kaynaklı gerilimleri tetikleyebilmektedir. Bu nedenle su kıtlığıyla mücadelede yalnızca su arzını artıran teknik çözümler değil, aynı zamanda ekosistem koruma, verimli kullanım, altyapı iyileştirme ve adil erişimi önceleyen bütünlük politikalar geliştirilmelidir (UN-Water, 2024; UNICEF vd., 2025).

### Su Kıtlığı Yaşayan Ülkeler ve Çözüm Yaklaşımları

Küresel ısınma, nüfus artışı, kentleşme ve üretim baskısı, dünya genelinde su kaynaklarına olan talebi artırmaktadır. Su kaynaklarının ülkeler arasında dengesiz dağılımı, tarımsal su kullanımı, şebeke kayıpları ve verimsiz yönetim uygulamaları, kişi başına düşen kullanılabilir su miktarını azaltarak su kıtlığı riskini derinleştirmektedir. Kişi başına düşen yıllık kullanılabilir su miktarı, ülkelerin su zenginliği veya su kıtlığı düzeyini belirlemede temel göstergelerden biridir (UN-Water, 2024).

Tablo 4. Kişi başına düşen yıllık kullanılabilir su miktarı (Kılıç, 2018).

| Sınıf                     | Kişi Başına Düşen Su Miktarı  |
|---------------------------|-------------------------------|
| Su Zengini Ülkeler        | > 10.000 m <sup>3</sup>       |
| Yeterli Suyu Olan Ülkeler | 3.000 - 10.000 m <sup>3</sup> |
| Su Kıtlığı Çeken Ülkeler  | < 3.000 m <sup>3</sup>        |
| Su Fakiri Ülkeler         | < 1.000 m <sup>3</sup>        |

Kişi başına düşen su miktarı; doğal su varlığı, nüfus büyüklüğü ve suyun kullanım biçimiyle doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle sınırlı kaynaklara sahip, nüfusu artan veya suyu etkin yönetemeyen ülkelerde su kıtlığı daha hızlı

derinleşmekte; içme suyu, tarım, sanayi ve ekosistemler üzerinde doğrudan etkiler oluşturmaktadır (Çokçalışkan, 2026).

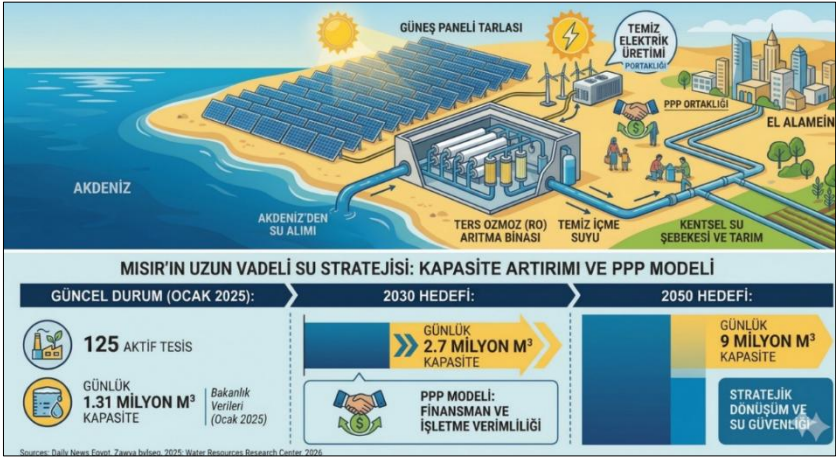
Bu çalışmada ele alınan ülkeler, geliştirdikleri çözüm modellerine göre dört grupta değerlendirilmektedir: Mısır ve Ürdün arz artırıcı altyapı çözümleriyle; Singapur döngüsel su yönetimiyle; Belçika kentsel su yönetimi uygulamalarıyla; Almanya ise yağmur suyu hasadı ve teşvik temelli politikalarla öne çıkmaktadır. Bu sınıflandırma, ülke uygulamalarının yalnızca tanıtılmasını değil, hangi su kıtlığı sorununa hangi çözüm modelinin geliştirildiğini göstermesi bakımından önemlidir. Böylece her ülke; su kaynakları durumu, temel yönetim sorunu ve sürdürülebilir çözüm yaklaşımı çerçevesinde değerlendirilecektir (UN-Water, 2024; Çokçalışkan, 2026).

### **Mısır'ın Su Kaynakları ve Deniz Suyu Arıtma Yaklaşımı**

Mısır, su kaynakları bakımından büyük ölçüde Nil Nehri'ne bağımlı olan ve sınırlı yağış koşulları nedeniyle ciddi su stresi yaşayan ülkelerden biridir. İçme suyu, tarım, sanayi, enerji, ulaşım ve ekosistem ihtiyaçlarının aynı kaynaklar üzerinden karşılanması, ülkede su yönetimini oldukça karmaşık hâle getirmektedir. Mısır'da su kıtlığını derinleştiren temel unsurlardan biri düşük ve bölgesel olarak dengesiz yağış rejimidir. Kuzey kıyılarında görece daha yüksek olan yağış miktarı, iç ve güney bölgelerde neredeyse yok denecek düzeye inmektedir. Bu durum, ülkenin su arzında yağıştan çok Nil Nehri'ne ve alternatif su temin yöntemlerine bağımlı olduğunu göstermektedir. Düşük yağış koşullarına ek olarak nüfus artışı da Mısır'ın su kaynakları üzerindeki baskısını artırmaktadır. 2020-2024 döneminde devam eden nüfus artışı, kişi başına düşen kullanılabilir su miktarını azaltmakta ve ülkeyi mutlak su kıtlığı riskiyle karşı karşıya bırakmaktadır (YCharts, 2025; Ahram, 2026; World Bank, 2026; Wikipedia, t.y.).

Mısır'ın su kıtlığıyla mücadelede öne çıkan çözüm modellerinden biri deniz suyunun arıtılmasıdır. Bu yaklaşım, Nil Nehri'ne olan yüksek bağımlılığı azaltmayı ve alternatif su kaynakları oluşturmayı hedefleyen stratejik bir su güvenliği politikası olarak değerlendirilmektedir (MOIC, 2023).

El Alamein projesi, Mısır'ın deniz suyu arıtma yatırımları içinde dikkat çekici bir örnektir. Ters ozmoz yöntemiyle çalışan ve enerji ihtiyacının bir kısmını güneş panellerinden karşılayan proje, hem su arzını artırmayı hem de çevresel sürdürülebilirliği desteklemeyi amaçlamaktadır. Mısır'ın uzun vadeli hedefi, deniz suyu arıtma kapasitesini 2030 ve 2050 yıllarında önemli ölçüde artırmaktır. Bu hedeflerde kamu-özel sektör ortaklığı modeli önemli bir finansman aracı olarak öne çıkmaktadır. Mısır örneği, büyük ölçekli arz artırıcı çözümlerin enerji verimliliği, finansman yapısı, teknoloji kapasitesi ve uzun vadeli su güvenliği politikalarıyla birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Huan vd., 2026; Staff Writer, 2026).



**Şekil 1.** Mısır'da deniz suyu arıtımı yoluyla alternatif su kaynağı geliştirme yaklaşımı (Huan vd., 2026; Staff Writer, 2026).

Genel olarak Mısır deneyimi, düşük yağış, nüfus artışı ve tek bir ana su kaynağına bağımlılığın su kıtlığını derinleştirdiği ülkelerde deniz suyu arıtımının stratejik bir çözüm modeli olabileceğini göstermektedir. Ancak bu modelin sürdürülebilirliği, enerji verimliliği, maliyet yönetimi, atıksu geri kazanımı, sulama verimliliği ve havza ölçekli iş birliğiyle desteklenmelidir (Huan vd., 2026; Staff Writer, 2026).

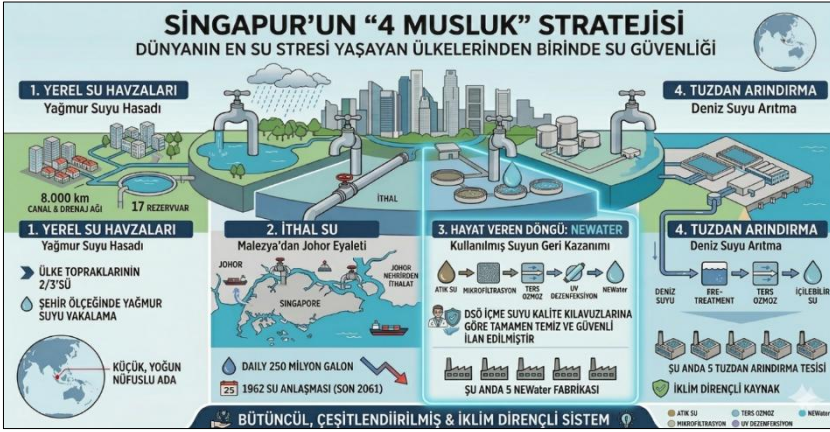
### Ürdün'ün Su Kaynakları ve Temiz Su Taşıma Projesi

Ürdün, düşük ve değişken yağış, sınırlı yüzey suyu, yeraltı sularının aşırı kullanımı ve yönetim sorunları nedeniyle dünyanın en yüksek su stresi yaşayan ülkelerinden biridir. Kişi başına düşen yıllık yenilenebilir su miktarının yaklaşık 100 m<sup>3</sup> düzeyinde olması, ülkenin mutlak su kıtlığı eşiğinin oldukça altında kaldığını göstermektedir. Ürdün'de su kıtlığını artıran temel faktörlerden biri yağış rejiminin düzensizliğidir. 2024-2025 yağış sezonunda birçok bölgede yağışlar mevsim normallerinin oldukça altında kalmış; bu durum ülkenin geleneksel yağış ve yüzey suyu kaynaklarına dayalı su temininin kırılganlığını ortaya koymuştur. Nüfus artışı ve göç hareketleri de Ürdün'ün sınırlı su kaynakları üzerindeki baskısını artırmaktadır. 2020-2026 döneminde nüfusun 10,8 milyondan 11,5 milyonun üzerine çıkması, kişi başına düşen kullanılabilir su miktarını daha da sınırlandırmaktadır (Al-Alawi, 2025; JT, 2025a; Worldometers, t.y.).

Ürdün'ün öne çıkan çözüm modeli, Kızıldeniz'den alınacak deniz suyunun arıtılarak yaklaşık 450 kilometrelik boru hattıyla başkent Amman başta olmak üzere ülke geneline taşınmasıdır. Bu proje, yalnızca bir arıtma yatırımı değil, suyun ülke içinde yeniden dağıtılmasını sağlayan büyük ölçekli bir su güvenliği altyapısıdır. Projenin toplam su tedarikini yaklaşık %40 artırması, kişi başına düşen yıllık su miktarını yükseltmesi ve su temin sıklığını artırması



yerel ve alternatif kaynaklarını güçlendirme politikalarını daha önemli hâle getirmiştir (MSE, 2025).



Şekil 3. Singapur’da su arz güvenliğini sağlayan Dört Musluk stratejisi (MSE, 2025).

NEWater, kullanılmış suyun mikrofiltasyon, ters ozmoz ve dezenfeksiyon aşamalarından geçirilerek yüksek kaliteli geri kazanılmış suya dönüştürülmesini sağlamaktadır. Deniz suyunun ters ozmozla arıtılması ise özellikle kurak dönemlerde tamamlayıcı bir kaynak olarak su arz güvenliğini desteklemektedir (MSE, 2025).

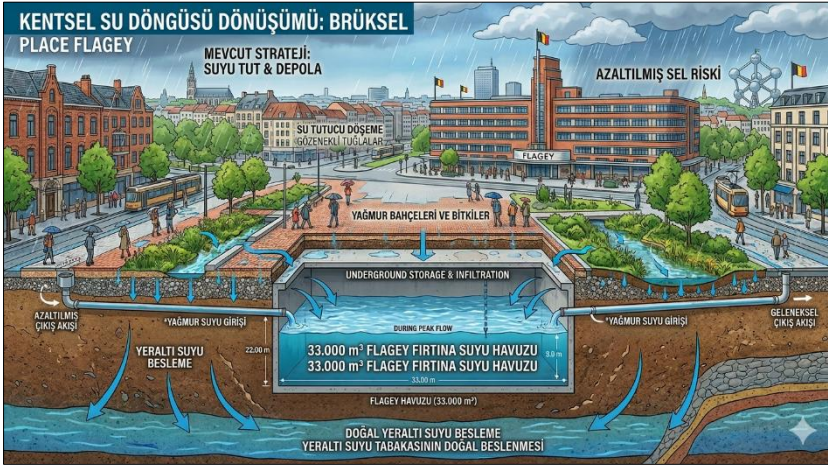
Genel olarak Singapur deneyimi, su kıtlığıyla mücadelede kaynak çeşitliliği, atıksuyun geri kazanımı, yağmur suyunun etkin toplanması ve dışa bağımlılığın azaltılması gerektiğini göstermektedir. Bu model, yoğun kentleşmiş ve doğal su kaynakları sınırlı bölgeler için döngüsel su yönetimi açısından güçlü bir örnek oluşturmaktadır (MSE, 2025).

### Belçika’nın Su Kaynakları ve Kentsel Su Depolama Yaklaşımı

Belçika, yağışlı iklim kuşağında yer almasına rağmen son yıllarda kuraklık eğilimleri ve yağış rejimindeki dalgalanmalar nedeniyle su yönetimi açısından daha kırılgan hâle gelmiştir. 2025 yılındaki düşük yağış değerleri, ülkede su yönetiminin yalnızca taşkın kontrolüyle değil, kuraklık ve su tutma kapasitesiyle birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir. Belçika’da nüfus artışı ve göç hareketleri, özellikle kentlerde su talebi, altyapı kapasitesi ve yağmur suyu yönetiminin birlikte planlanmasını gerekli kılmaktadır. Artan nüfus, geçirimsiz yüzeylerin çoğalması ve drenaj sistemleri üzerindeki baskının artması bakımından önem taşımaktadır (Pala, 2025; Statbel, 2025; Statbase, 2026; Urbistat, 2026).

Belçika’nın öne çıkan çözüm modeli, Brüksel örneğinde görülen yeraltı su depolama tankları, geçirgen yüzeyler ve sünger şehir yaklaşımıdır (Huan vd., 2026).





Şekil 4. Brüksel'de yeraltı su depolama ve geçirgen yüzey uygulamalarına dayalı kentsel su yönetimi yaklaşımı (Huan vd., 2026).

Bu model, yağmur suyunu kentten hızla uzaklaştırmak yerine yerinde tutmayı, geçici olarak depolamayı ve doğal döngüye yeniden kazandırmayı amaçlamaktadır. Brüksel'de kamu meydanlarının altına inşa edilen büyük hacimli yeraltı depolama tankları, şiddetli yağışlarda pik akışı azaltmakta ve kanalizasyon sistemleri üzerindeki yükü hafifletmektedir. Geçirgen yüzey uygulamaları ise yağmur suyunun toprağa sızmasını destekleyerek yeraltı sularının beslenmesine ve kentsel dayanıklılığın artmasına katkı sağlamaktadır (Huan vd., 2026).

Genel olarak Belçika deneyimi, değişken yağış rejimi, kurak dönemler ve ani yağış riskleri karşısında kentsel su yönetiminin önemini ortaya koymaktadır. Yeraltı depolama tankları, geçirgen yüzeyler ve yeşil altyapı uygulamaları, su kıtlığı, taşkın riski ve kentsel iklim dayanıklılığı arasında bütünleşik bir çözüm modeli sunmaktadır (Huan vd., 2026).

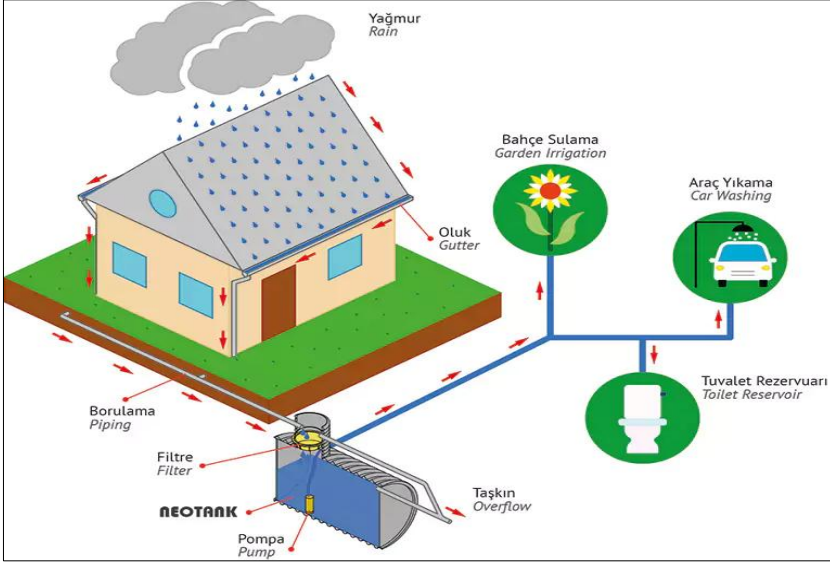
### Almanya'nın Su Kaynakları ve Yağmur Suyu Hasadı Yaklaşımı

Almanya, gelişmiş altyapısına rağmen son yıllarda yağış düzensizlikleri, kurak dönemlerin uzaması ve nehir su seviyelerindeki düşüşler nedeniyle su yönetiminde daha hassas bir sürece girmiştir. 2025 yılında yağış miktarının belirgin biçimde azalması, su yönetiminin hem kuraklık hem de aşırı yağış koşullarını dikkate alacak şekilde planlanması gerektiğini göstermektedir. 2025 baharındaki kuraklık, Almanya'da su kaynakları üzerindeki baskının ulaşım ve ekonomi gibi alanlara da yansıdığını göstermiştir. Ren Nehri'nde su seviyesinin düşmesi, nehir taşımacılığını etkilemiş ve kuraklığın ekonomik sistemler üzerindeki dolaylı etkisini ortaya koymuştur (Wetterkontor, t.y.).

Almanya'da nüfus genel olarak artış eğilimi gösterirken, kişi başına günlük içme suyu tüketiminin uzun vadede azalması su verimliliği açısından olumlu bir göstergedir. Bu durum, talep yönetimi ve su tasarrufu uygulamalarının

sürdürülebilir su yönetiminde önemli bir tamamlayıcı araç olduğunu göstermektedir (Statistisches Bundesamt, 2024; Toolbase, 2025).

Almanya'nın öne çıkan çözüm modellerinden biri Bremen'de uygulanan yağmur suyu hasadı ve teşvik sistemidir.



**Şekil 5.** Bremen’de yağmur suyu hasadı ve teşvik temelli kentsel su yönetimi yaklaşımı (Dinç, 2025).

Bu modelde yağmur suyunu toplayan, depolayan veya toprağa sızdıran haneler ücret indirimi ya da muafiyetlerden yararlanmakta; böylece bireysel katılım desteklenmektedir. Bremen modeli, yağmur suyu yönetimini yalnızca belediye altyapısına bağlı olmaktan çıkararak hane ölçeğine taşımaktadır. Sağlanan mali destekler, yağmur suyu toplama ve sızdırma sistemlerinin yaygınlaşmasını kolaylaştırmakta ve kentsel su yönetimine katılımcı bir nitelik kazandırmaktadır. Yağmur suyu hasadı, Bremen’de şebeke suyu kullanımının azaltılması, kanalizasyon yükünün hafifletilmesi ve taşkın riskinin düşürülmesi açısından çok yönlü katkılar sunmaktadır. Bu yönüyle model, yeşil altyapı ve sürdürülebilir kentsel su yönetimi açısından önemli bir örnek oluşturmaktadır (Dinç, 2025).

Genel olarak Almanya deneyimi, yağmur suyu hasadının yalnızca teknik bir depolama yöntemi değil; ekonomik teşvikler, kentsel geçirgenlik, hane ölçekli katılım ve altyapı yükünün azaltılmasıyla birlikte ele alınması gereken bütünlük bir su yönetimi yaklaşımı olduğunu göstermektedir (Dinç, 2025).

### Ülke Uygulamalarının Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi

İncelenen ülke örnekleri, su kıtlığıyla mücadelede tek tip bir çözüm yaklaşımının yeterli olmadığını ortaya koymaktadır. Coğrafi yapı, iklim

koşulları, nüfus baskısı, ekonomik kapasite, teknolojik altyapı ve yönetsel öncelikler, ülkelerin uyguladığı politikaları doğrudan belirlemektedir. Mısır ve Ürdün’de düşük yağış, sınırlı doğal su kaynakları ve artan nüfus baskısı nedeniyle deniz suyu arıtımı ile su taşıma projeleri stratejik arz artırıcı çözümler olarak öne çıkmaktadır. Singapur’da ise yüksek yağışa rağmen sınırlı yüzölçümü, depolama yetersizliği ve dış kaynaklara bağımlılık, su yönetimini kaynak çeşitliliği temelinde şekillendirmiştir. Bu kapsamda ‘Dört Musluk’ stratejisi; yerel su havzaları, ithal su, NEWater ve deniz suyu arıtımını birlikte değerlendirerek döngüsel su yönetimine dayalı güçlü bir model sunmaktadır (JT, 2025b; MSE, 2025; Huan vd., 2026; JT, 2026; Staff Writer, 2026).

Belçika ve Almanya’da su kıtlığıyla mücadele daha çok kentsel su yönetimi, yağmur suyu hasadı ve altyapı dayanıklılığı üzerinden ele alınmaktadır. Belçika’da yeraltı depolama tankları, geçirgen yüzeyler ve sünger şehir uygulamaları; Almanya’da ise Bremen yağmur suyu hasadı ve teşvik modeli, yağış suyunun kent içinde daha etkin yönetilmesine katkı sağlamaktadır. Bu durum, sürdürülebilir su yönetiminin yalnızca yeni su kaynakları üretmeye değil, mevcut kaynakların korunmasına, yeniden kullanılmasına ve etkin biçimde yönetilmesine bağlı olduğunu göstermektedir (Dinç, 2025; MSE, 2025; Huan vd., 2026; JT, 2026).

Tablo 5. Su kıtlığıyla mücadelede ülke uygulamalarının karşılaştırmalı değerlendirilmesi (Dinç, 2025; Huan vd., 2026; Staff Writer, 2026).

| Ülke     | Temel Su Sorunu                                                            | Öne çıkan çözüm modeli                                               | Çözümün temel niteliği                      | Sürdürülebilirlik katkısı                                                    |
|----------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Mısır    | Düşük yağış, Nil Nehri’ne yüksek bağımlılık, nüfus baskısı                 | Deniz suyu arıtma tesisleri                                          | Arz artırıcı altyapı çözümü                 | Alternatif su kaynağı oluşturma, Nil’e bağımlılığı azaltma                   |
| Ürdün    | Mutlak su kıtlığı, düşük kişi başı su miktarı, sınırlı yüzey suyu          | Deniz suyu arıtımı ve uzun mesafeli temiz su taşıma                  | Arz artırıcı ve mekânsal su dağıtım çözümü  | Su temin sıklığını artırma, yeraltı suyu baskısını azaltma                   |
| Singapur | Sınırlı yüzölçümü, doğal depolama alanı yetersizliği, ithal su bağımlılığı | Dört Musluk stratejisi ve NEWater                                    | Döngüsel ve çeşitlendirilmiş su yönetimi    | Atıksuyun yeniden kullanımı, kaynak çeşitliliği, iklim dayanıklılığı         |
| Belçika  | Yağış rejiminde dalgalanma, kentsel yüzey akışı, taşkın ve kuraklık riski  | Yeraltı depolama tankları, geçirgen yüzeyler, sünger şehir yaklaşımı | Kentsel su yönetimi ve yeşil altyapı çözümü | Yağmur suyunu yerinde tutma, taşkın riskini azaltma, yeraltı suyu beslenmesi |

|         |                                                                          |                                           |                                           |                                                                                                   |
|---------|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Almanya | Kurak dönemler,<br>nehir<br>seviyelerinde<br>düşüş, kentsel su<br>talebi | Yağmur suyu<br>hasadı ve<br>teşvik modeli | Teşvik<br>temelli<br>yerel su<br>yönetimi | Şebeke suyu<br>kullanımını azaltma,<br>kanalizasyon yükünü<br>hafifletme, hane<br>ölçekli katılım |
|---------|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|

Karşılaştırma, su kıtlığıyla mücadelede yalnızca teknik altyapı yatırımlarının yeterli olmadığını ortaya koymaktadır. Deniz suyu arıtımı, yağmur suyu hasadı, geçirgen yüzeyler ve sünger şehir uygulamaları ancak enerji, maliyet, çevresel etki, planlama, teşvik ve toplumsal katılım boyutlarıyla birlikte ele alındığında sürdürülebilir sonuçlar verebilir (Dinç, 2025; Huan vd., 2026; Staff Writer, 2026).

Ülke uygulamaları, sürdürülebilir su yönetiminin kaynak çeşitliliği, mevcut suyun döngüsel kullanımı ve yönetsel-ekonomik araçlarla desteklenen bütünleşik yönetim ilkelerine dayandığını göstermektedir. Bu nedenle başarılı modeller, yalnızca su üretmeye değil; suyu korumaya, yeniden kullanmaya, depolamaya, talebi yönetmeye ve kullanıcıları sürece dâhil etmeye odaklanmaktadır (Dinç, 2025; MSE, 2025; Huan vd., 2026).

## SONUÇ

Su kıtlığı, iklim değişikliği, nüfus artışı, kentleşme, tarımsal su kullanımı, altyapı kayıpları, su kirliliği ve yönetim sorunlarıyla birlikte çok boyutlu bir kriz hâline gelmiştir. Kullanılabilir tatlı su kaynaklarının sınırlı olması, su güvenliğini küresel ölçekte stratejik bir konuya dönüştürmektedir. Bu nedenle mücadele yalnızca yeni su kaynakları üretmeye değil; mevcut kaynakların korunmasına, verimli kullanılmasına, yeniden değerlendirilmesine ve adil biçimde yönetilmesine dayanmalıdır.

İncelenen ülke örnekleri, su kıtlığına karşı geliştirilen çözümlerin ülkelerin coğrafi, iklimsel, ekonomik ve yönetsel koşullarına göre farklılaştığını göstermektedir. Mısır ve Ürdün’de düşük yağış, sınırlı doğal su kaynakları ve nüfus baskısı nedeniyle deniz suyu arıtımı ile temiz su taşıma projeleri öne çıkmaktadır. Ancak bu büyük ölçekli altyapı çözümlerinin enerji ihtiyacı, maliyet ve çevresel etkileri nedeniyle yenilenebilir enerji, talep yönetimi ve atıksu geri kazanımı gibi tamamlayıcı politikalarla desteklenmesi gerekmektedir.

Singapur örneği, kaynak çeşitliliği ve döngüsel su yönetiminin önemini ortaya koymaktadır. Sınırlı yüzölçümü ve yetersiz doğal depolama kapasitesi nedeniyle su güvenliği açısından kırılgan olan ülkede, ‘Dört Musluk’ stratejisiyle yerel su havzaları, ithal su, ileri arıtılmış atık su ve deniz suyu arıtımı birlikte kullanılmaktadır. NEWater uygulaması, atıksuyun ileri arıtma teknolojileriyle yeniden güvenilir bir kaynağa dönüştürülebileceğini göstermektedir.

Belçika ve Almanya’da ise su kıtlığıyla mücadele daha çok kentsel su yönetimi üzerinden şekillenmektedir. Belçika’da yeraltı depolama tankları, geçirgen yüzeyler ve sünger şehir uygulamaları; Almanya’da ise Bremen yağmur suyu hasadı ve teşvik modeli, yağmur suyunun kent içinde tutulması, depolanması ve yeniden değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu uygulamalar, merkezi altyapı yatırımlarının yanında hane ve mülk ölçeğindeki katılımcı çözümlerin de önemini göstermektedir.

Genel olarak başarılı ülke örnekleri, suyun yalnızca tüketilen bir doğal kaynak olarak değil; korunması, yeniden kullanılması, depolanması ve adil biçimde yönetilmesi gereken stratejik bir değer olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir. Bu doğrultuda sürdürülebilir çözüm modelleri, tek bir uygulamaya dayalı dar kapsamlı yaklaşımlar yerine, birbirini tamamlayan bütünsel politikalar üzerine kurulmalıdır. Arz artırıcı altyapı çözümleri kapsamında deniz suyu arıtımı, temiz su taşıma projeleri ve yeni depolama sistemleriyle kullanılabilir su miktarı artırılabilir; ancak bu çözümlerin enerji tüketimi, maliyet ve çevresel etkiler bakımından dikkatle planlanması gerekmektedir. Döngüsel su yönetimi ise atıksuyun ileri arıtma teknolojileriyle yeniden kullanılması, gri su sistemlerinin yaygınlaştırılması ve suyun kullanım sonrasında tekrar ekonomik ve ekolojik döngüye kazandırılması açısından önem taşımaktadır. Bunun yanında yağmur suyu hasadı, geçirgen yüzeyler, yeraltı

depolama tankları ve sünger şehir uygulamaları gibi kentsel su yönetimi yaklaşımları, yağış suyunun kent içinde tutulmasına, taşkın riskinin azaltılmasına ve yeraltı su kaynaklarının desteklenmesine katkı sağlamaktadır. Su talebinin azaltılması, kayıp-kaçak oranlarının düşürülmesi, akıllı sulama tekniklerinin kullanılması ve kullanıcı davranışlarının dönüştürülmesi de sürdürülebilir su yönetiminin tamamlayıcı unsurları arasında yer almaktadır. Bu nedenle uzun vadeli su güvenliği, yalnızca teknik yatırımlarla değil; ekonomik teşvikler, kurumsal düzenlemeler, yerel yönetimlerin etkinliği ve toplumun farklı kesimlerinin su yönetimi sürecine katılımıyla sağlanabilmektedir. Böyle bir yaklaşım, su kıtlığı riskinin azaltılmasına, ekosistemlerin korunmasına, kentlerin iklim değişikliğine uyum kapasitesinin artırılmasına ve gelecek kuşaklar için daha dayanıklı bir su yönetimi yapısının oluşturulmasına katkı sağlayacağı

## KAYNAKÇA

- A. O. Smith Evimde (AOSE). (2024, Şubat 5). Su kıtlığının nedenleri ve alınabilecek önlemler. <https://www.aosmithevimde.com/su-kitliginin-nedenleri-ve-alinabilecek-onlemler>
- Ahram Online. (2026, April 7). Egypt's per capita water share drops to 500 cubic metres amid widening supply-demand gap. Ahram Online. <https://english.ahram.org/NewsContent/1/1235/565510/Egypt/Urban--Transport/Egypt%E2%80%99s-per-capita-water-share-drops-to--cubic-met.aspx>
- Al-Alawi, M. (2025, May 29). Water scarcity and groundwater overextraction in Jordan: A growing crisis. Space4Water Portal. <https://mail.space4water.org/local-perspectives-case-studies/water-scarcity-and-groundwater-overextraction-jordan-growing-crisis>
- Başaran, M. (2022, Nisan). Dünya’da ve Türkiye’de su kıtlığı. Mühendis ve Makina Güncel, (64), 42–46. [https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/014\\_6.pdf](https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/014_6.pdf)
- Çokçalışkan, H. (2026). Dünyada su kıtlığı, nüfus artışı ve gelecek tehlikesi. <https://mucem.mu.edu.tr/tr/dunyada-su-kitligi-nufus-artisi-ve-gelecek-tehlikesi-10182>
- Dinç, O. (2025, December 10). Bremen (Almanya) – Yağmur suyuyla su tasarrufu: Akıllı teşviklerle sürdürülebilirlik. <https://okandinc.com/2025/12/10/bremen-almanya-yagmur-suyuyla-su-tasarrufu-akilli-tesviklerle-surdurulebilirlik/>
- Doğan, M. (2023). Sürdürülebilirlik: Su ve suyun önemi. Avrasya Sosyal ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi, 10(1), 176-192.
- Ekopak. (2024, January 31). Physical and economic water scarcity: What’s the difference? <https://ekopakwater.com/en/physical-and-economic-water-scarcity-whats-the-difference/>
- Gezer, A., & Erdem, A. (2018). Su stresi, su kıtlığı ve su tasarrufu hakkında halkın farkındalığının belirlenmesi: Akdeniz Üniversitesi örnek çalışması. Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 4(2), 113-122.
- Huang, P., Mang, J., & Niu, R. (2026, March 31). 优化水资源利用推进可持续发展 (国际视点) ——埃及、韩国和比利时探索加强水治理 [Optimizing water resource utilization and promoting sustainable development: Egypt, South Korea and Belgium explore strengthening water governance]. People’s Daily. [https://www.waterinfo.com.cn/xsyj/tszs/202604/t20260408\\_37890.html](https://www.waterinfo.com.cn/xsyj/tszs/202604/t20260408_37890.html)

- Huang, Y., & Zhang, Y. (2020, March 23). 新加坡从过去到现在的水资源挑战 [Singapore's water resource challenges from past to present]. Lianhe Zaobao. <https://www.zaobao.com.sg/zopinions/views/story20200323-1039346>
- Jordan Times (JT). (2025a, May 19). Rainfall season falls short of averages – JMD. The Jordan Times. <https://mideastenvironment.apps01.yorku.ca/2025/05/rainfall-season-falls-short-of-averages-jmd-jordan-times/>
- JT. (2025b, September 30). 2MW solar venture launched to power Disi water project. The Jordan Times. <https://jordantimes.com/news/business/2mw-solar-venture-launched-to-power-disi-water-project>
- JT. (2026, April 21). Gov't signs technical, legal agreement for National Carrier Project. The Jordan Times. <https://jordantimes.com/news/local/govt-signs-technical-legal-agreement-for-national-carrier-project>
- Kılıç, B. (2018). 22 Mart Dünya Su Günü. Dokuz Eylül Üniversitesi Araştırma Uygulama Hastanesi. <https://hastane.deu.edu.tr/kurumsal/46-hastanemizden-haberler/1979-22-mart-dunya-su-gunu.html>
- Kirkland, C. (2023, July 25). How much water do we really have? A look at the global freshwater distribution. World Economic Forum. <https://www.weforum.org/stories/2023/07/global-distribution-fresh-water-withdrawals/>
- Lai, O. (2022, June 26). Water shortage: Causes and effects. Earth.Org. <https://earth.org/causes-and-effects-of-water-shortage/>
- Liu, W., Fu, Z., van Vliet, M. T., Davis, K. F., Ciais, P., Bao, Y., ... & Wada, Y. (2025). Global overlooked multidimensional water scarcity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 122(26), e2413541122.
- Ministry of International Cooperation (MOIC). (2023, November 19). The Ministry of International Cooperation announces the results of the coordination with development partners to start implementing water projects within the NWFE program in its 1st progress report. <https://moic.gov.eg/index.php/news/1225>
- Ministry of Sustainability and the Environment (MSE). (2026, May 12). Water. Government of Singapore. <https://www.mse.gov.sg/policies/water/>
- National Population and Talent Division (NPTD). (2026, May 21). Overall population. <https://www.population.gov.sg/our-population/population-trends/overall-population/>
- Pala, M. (2025, December 19). Belgium faces driest year in nearly 50 years. Anadolu Agency. <https://www.aa.com.tr/en/europe/belgium-faces-driest-year-in-nearly-50-years/3775912>



- Schauenberg, T. (2024, October 1). How Singapore got a grip on water scarcity. Deutsche Welle. <https://www.dw.com/en/how-singapore-got-a-grip-on-water-scarcity/a-70362786>
- Staff Writer. (2026, March 17). Egypt to offer seawater desalination plants to private sector for operation, maintenance. Daily News Egypt. ZAWYA. <https://www.zawya.com/en/projects/utilities/egypt-to-offer-seawater-desalination-plants-to-private-sector-for-operation-maintenance-rqeykpnv>
- Statbase. (2026). Average annual precipitation | Belgium (1901–2024): Data, charts & analysis. <https://statbase.org/data/BEL-average-annual-precipitation/>
- Statbel. (2025, June 11). On 01 January 2025, Belgium had 11,825,551 inhabitants. <https://statbel.fgov.be/en/themes/population/structure-population>
- Statistisches Bundesamt. (2024, November 14). Public water supply in Germany, 1991 to 2022. Destatis. <https://www.destatis.de/EN/Themes/Society-Environment/Environment/Water-Management/Tables/ww-01-rate-connection-water-supply-1991-2022.html>
- Toolbase (2025). Germany population development 2014-2025. <https://toolbase.x-inno-radar.eu/chart/germany-population-development-2014-2025/>
- UNESCO World Water Assessment Programme. (2021). The United Nations World Water Development Report 2021: Valuing water. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375724>
- United Nations Children’s Fund, World Health Organization, & World Bank Group. (2025). Levels and trends in child malnutrition: UNICEF/WHO/World Bank Group Joint Child Malnutrition Estimates: Key findings of the 2025 edition. World Health Organization. <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/a0aad785-4ff8-43d7-bdf9-be6c9a221e8e/content>
- UN-Water (2024). Water Scarcity. UN-Water Facts. <https://www.unwater.org/water-facts/water-scarcity>
- Urbistat. (2026). Belgium: Demographic balance, population trend, death rate, birth rate, migration rate. AdminStat. <https://ugeo.urbistat.com/AdminStat/en/be/demografia/popolazione/belgium/56>
- Water Science School (WSS). (2019, November 13). How much water is there on Earth? U.S. Geological Survey. <https://www.wet.gov/water-science-school/science/how-much-water-there-earth>
- WetterKontor. (t.y.). Gebietsmittel: Jahreswerte Deutschland. Erişim tarihi: 3 Haziran 2026, <https://www.wetterkontor.de/wetter-rueckblick/gebietsmittel/jahreswerte/deutschland>

- Wikipedia contributors. (t.y.). Water resources management in Egypt. In Wikipedia. Erişim tarihi :15 Mayıs, [https://en.wikipedia.org/wiki/Water\\_resources\\_management\\_in\\_Egypt](https://en.wikipedia.org/wiki/Water_resources_management_in_Egypt)
- World Bank. (2026). Egypt, Arab Republic of: Climatology (CRU). Climate Change Knowledge Portal. <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/egypt-arab-republic/climate-data-historical>
- Worldometer. (t.y.). Ürdün nüfusu. Erişim tarihi: 3 Haziran 2026, <https://www.worldometers.info/tr/dunya-nufusu/urdun-nufusu/>
- YCharts (2025). Egypt Population Growth. [https://ycharts.com/indicators/egypt\\_population\\_growth](https://ycharts.com/indicators/egypt_population_growth)





## *BÖLÜM 14*

# Kablo Askılı Beton Kutu Kirişli Köprülerde Yapısal Elemanlar, Tasarım İlkeleri ve Analiz Yöntemleri

*Şadiye Defne Akbaş<sup>1</sup>*

## 1. GİRİŞ

Köprüler, insanlık tarihinin en köklü mühendislik yapılarından biridir. İlk örneklerinin doğada hazır bulunan malzemelerle inşa edildiği düşünüldüğünde, geçen binlerce yıl içinde köprü mühendisliğinin ne derece dönüşüm geçirdiği daha iyi anlaşılmaktadır. Ahşap ve taştan çeliğe, geleneksel kirişten kablo askılı sistemlere uzanan bu dönüşüm, yalnızca malzeme ve teknolojideki gelişmeleri değil, yapısal düşüncede ve uygulamadaki değişimlerini de yansıtmaktadır (Chen ve Duan, 2014).

Kablo askılı köprüler yapısal dönüşümün en çarpıcı ürünlerinden biridir. 200 ile 500 metre arasındaki orta-uzun açıklıkların geçilmesinde öne çıkan bu köprüler, taşıyıcı elemanlar arasındaki yük paylaşımını, yüksek bir verimlilik düzeyine taşımaktadır; kablolar saf çekmeyle, tabliye baskın olarak eksenel basınçla, pilon ise her ikisinin bileşkesini temele ileterek çalışmaktadır. Bu iş bölümü, her malzemenin kapasitesinden en yüksek verimi elde etmeyi mümkün kılmaktadır (Gimsing ve Georgakis, 2012).

Ana taşıyıcı olarak beton kutu kiriş tabliyelinin bu sistemdeki yeri rastlantısal değildir. Tabliyelin eksenel yükler, burulma ve kablo kuvvetleri gibi birden fazla etki altında eş zamanlı çalışması zorunluluğu, kapalı kesit formunu işlevsel açıdan zorunlu kılmaktadır. Bu kesit biçiminin sağladığı rijitlik, ankraj kuvvetlerinin tabliye boyunca güvenle dağıtılabilmesi ve uzun vadeli bakım kolaylığı, beton kutu kirişli kablo askılı sistemlerin doğal tercih noktasına taşımaktadır (Lin ve Yoda, 2017). Bununla birlikte bu köprülerin başarılı tasarımı; yapısal mekanik, sayısal analiz, yönetmelik gereklilikleri ve mühendislik deneyiminin tamamını kapsayıcı şekilde bir araya getirilmesini zorunlu kılmaktadır (Chen ve Duan, 2014).

Bu bölüm, söz konusu bütüncül anlayışı aktarmak amacıyla hazırlanmıştır. Kablo askılı sistemlerin yapısal mantığından başlayarak beton kutu kesitlerin

---

<sup>1</sup> Öğr. Gör. Dr., Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Hekimhan Mehmet Emin Sungur MYO, İnşaat Bölümü, Yapı Denetim Programı, ORCID: 0000-0002-5560-8561

temel elemanlarına, tasarım ilkelerine ve sayısal analiz yöntemlerine uzanan bir çerçeve sunmaktadır. Amaç, bu köprülerin nasıl davrandığını ve nasıl analiz edilmesi gerektiğini, mühendislik uygulamalarına doğrudan rehberlik edecek biçimde ortaya koymaktır.

## **2. KABLO ASKILI KÖPRÜ SİSTEMİ VE BETON KUTU KİRİŞ**

Kablo askılı bir köprüde tabliye, zemine doğrudan değil eğik kablolar aracılığıyla pılona tutunmaktadır. Bu sistematik birleşim tabliyenin büyük açıklıklar boyunca neredeyse kesintisiz bir süreklilik içinde çalışmasına olanak tanımakta; düşey yükler kablolarla aktararak pilon üzerinden temele iletilmektedir. Geleneksel kiriş köprüsüyle kıyaslandığında bu köprü sistemindeki temel fark, eğilme momentinin büyük bölümünün kablolarca karşılanması ve tabliyenin çok daha ince bir kesitle tasarlanabilmesidir (Menn, 1990).

Bir kablo askılı köprünün mimari ve yapısal karakterini belirleyen en önemli unsurlardan biri kablo düzenidir (Gimsing ve Georgakis, 2012). Literatürde üç temel düzen tanımlanmaktadır. Birincisinde tüm kablolar tek bir noktadan, yani pilon tepesinden tabliyeye doğru açılmakta; bu görünüm nedeniyle "fan" adını almaktadır. İkincisinde kablolar pilon boyunca birbirinden ayrı yüksekliklerde sabitlenerek tabliyeye ulaşmakta ve birbirine paralel bir geometri oluşturmaktadır. Üçüncü ve en yaygın kullanılan düzen ise ilk iki düzen tipinin özelliklerinin dengeli biçimde harmanlandığı yarı fan tipidir. Tek pilon kullanıldığında bu geometrik tercih daha da kritik bir boyut kazanmaktadır çünkü tek taraflı kablo yerleşimi, tabliye üzerinde simetrik olmayan iç kuvvetler ve burulma etkileri doğurarak tasarım sürecini karmaşıklaştırmaktadır.

Beton kutu kirişin neden tercih edildiğine gelince, tabliyenin eksenel yükler, burulma ve kablo kuvvetleri birden fazla etki altında eş zamanlı çalışması zorunluluğu, kapalı kesit formunu işlevsel açıdan zorunlu kılmaktadır (Lin ve Yoda, 2017). Her şeyden önce, kapalı bir geometrinin burulma rijitliği, aynı malzeme miktarıyla oluşturulan açık kesitlere kıyasla kat kat yüksektir. Kablo askılı sistemlerde tabliye; kablo kuvvetlerinin dengesizliği, rüzgâr ve eksantrik trafik yüklerinden kaynaklanan sürekli bir burulma etkisi altında çalışmaktadır. Burulma etkisine karşı kutu kesit son derece elverişli bir çözüm sunmaktadır. Öte yandan kutu kesitin iç boşluğu, kablo ankraj kuvvetlerinin geniş bir alana yayılarak beton kütleyle aktarılmasına ve hem bakım personelinin hem de servis donanımının tabliye içinde güvenle hareket edebilmesine imkân tanımaktadır. Buna ek olarak, yuvarlak köşeli ve kapalı dış profili sayesinde rüzgâr yüklerine karşı aerodinamik açıdan avantajlı bir kesit formu oluşturulmakta; bu özellik özellikle uzun açıklıklı köprülerde titreşim kontrolü açısından değer kazanmaktadır (Menn, 1990).

### **3. BETON KUTU KİRİŞ TABLİYENİN YAPISAL ELEMANLARI**

Beton kutu kiriş tabliye, birbirini tamamlayan birkaç temel elemandan oluşmaktadır. Bu elemanların her biri belirli bir işlev üstlenmekte ve sistemin bütünsel davranışına katkıda bulunmaktadır. Elemanlar arasındaki uyum ve tutarlı boyutlandırma, tasarımın başarısını doğrudan belirlemektedir (Lin ve Yoda, 2017; fib, 2013).

#### **3.1. Üst ve Alt Döşeme**

Üst döşeme, trafik yüklerini doğrudan alan ve bu yükleri perdelere ileten elemandır. Hem yerel tekerlek yükü dağıtımı hem de global eğilme taşıyıcısı olarak çift işlev üstlenir. Geniş köprülerde kesme gecikmesi (shear-lag) etkisi nedeniyle döşeme genişliğinin tamamı efektif kabul edilemez; etkin genişlik kavramı bu etkiyi tasarıma yansıtmada kullanılan temel araçtır (Jiang ve diğerleri, 2023). Üst döşeme kalınlığı, minimum yönetmelik değerlerini sağlamanın ötesinde, donatı yerleşimi, klorür penetrasyonuna karşı beton örtüsü ve uzun vadeli dayanıklılık gereksinimleriyle birlikte belirlenmektedir (AASHTO, 2020; CEN, 2005).

Alt döşeme ise pozitif eğilme durumunda çekme bölgesinde yer alır ve uzunlamasına öngerme tendonlarına ev sahipliği yapar. Kablo askılı köprülerde kablo kuvvetlerinin tabliyede oluşturduğu aksel basınç, alt döşemeyi aynı zamanda bir basınç elemanı konumuna getirebilmektedir. Bu karmaşık gerilme durumu, alt döşemenin hem çekme hem basınç kapasitesi açısından değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır (Li ve diğerleri, 2020; fib, 2013).

#### **3.2. Perdeler (Gövdeler)**

Perdeler, üst ve alt döşemeyi birbirine bağlayan ve kesme kuvvetleri ile burulma etkilerini taşıyan düşey veya eğik plak elemanlardır (CEN, 2005). Kablo ankraj bölgelerinde perdeler, yoğun yerel kablo kuvvetlerinin kesit boyunca yayılmasında kritik bir rol üstlenir. Perde kalınlığı, kesme kapasitesi, öngerme kanallarının geçirilebilmesi ve yerel burkulma direnci gözetilerek belirlenmektedir (AASHTO, 2020). Modern uygulamalarda bazı köprülerde geleneksel beton perdeler yerine oluklu çelik gövdeler (corrugated steel web) kullanılmakta; bu yaklaşım hem öz ağırlığı azaltmakta hem de öngerme verimliliğini artırmaktadır (Hassanein ve Zhou, 2022).

#### **3.3. Enine Diyaframlar**

Enine diyaframlar, kutu kesitin iç boşluğunu boydan boya keserek perdeleri birbirine bağlayan rijit plak veya çerçeve elemanlardır. Başlıca işlevleri; burulma rijitliğinin artırılması, distorsiyon etkilerinin sınırlandırılması, mesnet bölgelerinde yük dağılımının sağlanması ve kablo ankraj kuvvetlerinin tabliye boyunca yayılması şeklinde sıralanabilir. (CEN, 2005; AASHTO, 2020). Mesnet bölgelerinde tam derinlikli diyaframlar kullanılırken, açıklık bölgelerinde daha

seyrek aralıklarda hafif diyaframlar tercih edilmektedir. Diyafram aralığının belirlenmesi, burulma davranışı ve yapım yöntemi açısından dikkatli bir optimizasyon gerektirmektedir (Menn, 1990).

### **3.4. Öngerme Tendonları ve Ankraj Bölgeleri**

Öngerme tendonları beton kutu tabliyenin ayrılmaz bileşenleridir. İç tendonlar betonla aderanslı olarak tabliyenin içine yerleştirilirken, dış tendonlar kutu kesitin iç boşluğunda ara ankraj bloğu aracılığıyla yönlendirilmektedir (Federal Highway Administration, 2015). Kablo askılı köprülerde tabliye öngerilmesi, kablo kuvvetleriyle birlikte optimize edildiğinde hem eğilme momentlerinin hem de sehimlerin kontrolü sağlanmaktadır (Li ve diğerleri, 2020; AASHTO, 2020).

Ankraj bölgeleri, yüksek yerel basınç ve yarıma gerilmelerinin yoğunlaştığı kritik detaylardır. Bu bölgelerde yetersiz donatı veya hatalı geometri, tabliyede erken yerel hasar oluşumuna zemin hazırlayabilmektedir. Sıkıştırılmış spiral donatı, başlık donatısı ve gerektiğinde kalınlaştırılmış beton bloklar, ankraj bölgesi tasarımında standart haline gelen çözümler arasında yer almaktadır (Post-Tensioning Institute, 2005; Federal Highway Administration, 2015).

### **4. TASARIM İLKELERİ VE SINIR DURUM YAKLAŞIMI**

Uluslararası köprü yönetmelikleri, tasarımı yük ve dayanım katsayılarına dayalı limit durum felsefesi çerçevesinde yürütmektedir. Bu yaklaşımda her yükleme durumu için faktörlü yük etkileri hesaplanmakta ve bunların uygun azaltma katsayısıyla çarpılan nominal dayanımı aşmaması koşulu aranmaktadır (Nowak ve Collins, 2012). AASHTO LRFD (2020) bu ilkenin en kapsamlı uygulama biçimlerinden birini sunmaktadır.

Dayanım limit durumunda tabliyenin eğilme, kesme ve burulma kapasiteleri ayrı ayrı ve kombine olarak kontrol edilmektedir (AASHTO, 2020; CEN, 2005). Hizmet limit durumunda ise sehim ve gerilme sınırları belirleyici rol üstlenir: servis yükü altında sehimin izin verilen aralıkta kalması, beton çatlak genişliğinin kontrol edilmesi ve donatı gerilmelerinin sınırlar içinde tutulması hedeflenmektedir. Kablo askılı köprülerde aşırı olay limit durumuna deprem yükleri girmekte ve ölü yüklerle kombinasyonu halinde yapının sismik kapasitesi sorgulanmaktadır (Priestley ve diğerleri, 1996).

Beton kutu kesitin boyutlandırılmasında açıklık-derinlik oranı belirleyici bir parametredir. Kablo askılı sistemlerde kablolar tabliyenin taşınması gereken eğilme momentini önemli ölçüde azalttığından, geleneksel kiriş köprülerine kıyasla çok daha ince kesitler kullanılabilir (Menn, 1990). Bu özgünlük, kablo askılı köprü tasarımının en çekici yönlerinden biridir. Kabloların sağladığı moment rahatlaması sayesinde tabliye, tek başına kiriş gibi çalışmak zorunda kalmaz. Kesit derinliğinin belirlenmesinde genellikle sehim kontrolü belirleyici kriter olarak öne çıkmaktadır (Lin ve Yoda, 2017; AASHTO, 2020).



## 5. SAYISAL ANALİZ YÖNTEMLERİ

Kablo askılı beton kutu giriş köprülerin davranışını doğru biçimde tahmin etmek, mühendisliğin en zorlu analitik görevlerinden biridir. Kablo gerilmesi, beton sünmesi, tabliye öngerilmesi ve zemin-yapı etkileşimi gibi etkenler aynı anda çalışmaktadır. Bu karmaşıklıkla başa çıkmak için modern köprü mühendisliği gelişmiş sayısal yöntemlere başvurmaktadır (Chen ve Duan, 2014; Zhao ve diğerleri, 2021).

### 5.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Modelleme

Sonlu elemanlar yöntemi, kablo askılı köprülerin analizinde hâkim yaklaşım olma konumunu sağlam biçimde korumaktadır (Zhao ve diğerleri, 2021). Köprü sistemi; tabliye için çerçeve veya kabuk elemanlar, pilon için çerçeve elemanlar ve kablolar için yalnızca çekme aktarabilen kablo elemanları kullanılarak modellenmektedir. Üç boyutlu modeller, tabliyenin enine davranışını, pilon ile tabliye arasındaki etkileşimi ve kablo kuvvetlerinin yerel etkilerini gerçekçi biçimde yansıtabilmektedir (Chen ve Duan, 2014).

CSIBridge gibi köprüye özgü yazılımlar bu süreci kolaylaştıran araçlarla donatılmıştır: parametrik kesit tanımı, AASHTO ve Eurocode gibi uluslararası yönetmeliklere entegre yük ve tasarım modülleri, aşamalı inşaat simülasyonu ve kablo germe analizi bunların başında gelmektedir (Computers and Structures, Inc., 2023). Yazılım, kablo elemanlarının doğrusal olmayan davranışını ve kablo sarkmalarını da hesaba katabilmektedir.

### 5.2. Statik Analizler

Tasarımın ön aşamalarında doğrusal statik analiz, iç kuvvetlerin hızla elde edilmesini ve kesit boyutlarının ön belirlenmesini sağlamaktadır. (Chen ve Duan, 2014). Ölü yükler, hareketli yükler, rüzgâr ve sıcaklık gibi her bir yük durumu ayrı yük deseni olarak tanımlanmakta; AASHTO LRFD'de belirlenen katsayılarla çarpılarak uygun kombinasyonlar oluşturulmaktadır (AASHTO, 2020). Kablo askılı sistemlerde kablo sarkması ve büyük deformasyon gibi doğrusal olmayan etkiler belirli açıklıklardan itibaren göz ardı edilemez hale gelmektedir; bu durumlarda doğrusal olmayan statik analizler zorunlu hale gelmektedir (Gimsing ve Georgakis, 2012).

Hareketli yük analizlerinde AASHTO LRFD'nin tanımladığı HL-93 yük modeli standart olarak kullanılmaktadır. Tasarım kamyonu ve tasarım tandemi, en elverişsiz iç kuvvetleri oluşturacak konumlarda tabliye boyunca hareket ettirilmekte ve her kesit için maksimum iç kuvvet değerleri belirlenmektedir (AASHTO, 2020).

### 5.3. Dinamik ve Sismik Analiz

Kablo askılı köprüler uzun doğal periyotları ve düşük sönüm oranları nedeniyle deprem etkilerine özgü bir değerlendirmeye tabi tutulmalıdır (Priestley

ve diğerleri, 1996). Modal analiz, yapının doğal titreşim periyotlarını ve mod şekillerini belirleyerek sistemin dinamik karakteristiğini ortaya koymaktadır. Kablo askılı köprülerde yeterli toplam kütle katılımını sağlamak için çok sayıda titreşim modunun analize dahil edilmesi gerekmektedir (Chopra, 2012).

Tepki spektrumu analizi, modal analizin çıktılarını yönetmelik spektrumuyla birleştirerek her mod için maksimum yapısal tepkileri hesaplamaktadır. Farklı modlardan gelen katkılar Tam Karesel Birleşim (CQC) gibi istatistiksel kombinasyon kurallarıyla birleştirilmektedir (Chopra, 2012). Bu yöntem tasarım aşamasında pratik bir verimlilik sunarken, daha kapsamlı değerlendirmeler için zaman tanım alanı analizi seçilmektedir (AASHTO, 2020; Priestley ve diğerleri, 1996).

## 6. SONUÇ

Kablo askılı beton kutu giriş köprüler, çağdaş köprü mühendisliğinin en ilgi çekici ve zorlu alanlarından birini oluşturmaktadır. Bu bölümde ele alınan konular, söz konusu köprülerin başarılı tasarımı için gerekli olan temel bilgi çerçevesini oluşturmaktadır.

Beton kutu kesitin yapısal elemanları üst ve alt döşeme, perdeler, diyaframlar, ankraj bölgeleri birbirini tamamlayan bir sistem olarak çalışmaktadır. Bu elemanların her biri kendi işlevini yerine getirirken sistemin bütünsel davranışına katkıda bulunur; herhangi birinin yetersizliği tüm sistemi olumsuz etkileyebilmektedir (Lin ve Yoda, 2017). Limit durum tasarım felsefesi, bu karmaşık etkileşimi hem yük hem dayanım belirsizliklerini hesaba katarak güvenli ve ekonomik bir çerçevede yönetmeye olanak tanımaktadır (Nowak ve Collins, 2012).

Sayısal analiz yöntemleri, özellikle sonlu elemanlar temelli köprüye özgü yazılımlar, tasarımcıya hem global davranışı hem de yerel detayları bütünsel şekilde değerlendirme imkânı sunmaktadır (Zhao ve diğerleri, 2021). Statik analizden dinamik ve sismik analize uzanan bu araç seti, modern köprü mühendisliğinin ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Bu bölümün sunduğu çerçevenin, kablo askılı beton kutu giriş köprülerle ilgili daha ileri araştırmalar ve mühendislik uygulamaları için sağlam bir zemin oluşturması amaçlanmaktadır.

## KAYNAKLAR

- AASHTO. (2020). AASHTO LRFD bridge design specifications (9. baskı). American Association of State Highway and Transportation Officials.
- CEN. (2003). EN 1991-2: Eurocode 1 – Actions on structures – Part 2: Traffic loads on bridges. European Committee for Standardization.
- CEN. (2005). EN 1992-2: Eurocode 2 – Design of concrete structures – Part 2: Concrete bridges. European Committee for Standardization.
- Chen, W. F., ve Duan, L. (2014). Bridge engineering handbook (2. baskı). CRC Press.
- Chopra, A. K. (2012). Dynamics of structures: Theory and application to earthquake engineering (4. baskı). Prentice Hall.
- Computers and Structures, Inc. (2023). CSiBridge version 25 reference manual. CSI.
- fib. (2013). fib model code for concrete structures 2010. Ernst & Sohn.
- Federal Highway Administration. (2015). Post-tensioned box girder design manual. FHWA.
- Gimsing, N. J., ve Georgakis, C. T. (2012). Cable supported bridges: Concept and design (3. baskı). Wiley.
- Hassanein, M. F., ve Zhou, M. (2022). Corrugated steel web girder bridges: A review. Thin-Walled Structures, 175, 109211.
- Jiang, R., Wu, Q., ve Ye, X. (2023). Shear lag effect in composite box girder bridges with corrugated steel webs. Thin-Walled Structures, 186, 110700.
- Li, Z., He, S., ve Liu, H. (2020). Shear lag effects in prestressed concrete cable-stayed bridge main girder during cantilever construction. Engineering Structures, 218, 110820.
- Lin, T. Y., ve Yoda, T. (2017). Bridge engineering: Classifications, design loading and analysis methods. Butterworth-Heinemann.
- Menn, C. (1990). Prestressed concrete bridges. Birkhäuser.
- Nowak, A. S., ve Collins, K. R. (2012). Reliability of structures (2. baskı). CRC Press.
- Post-Tensioning Institute. (2005). PTI DC10.5-12: Specification for unbonded single strand tendons. PTI.
- Priestley, M. J. N., Seible, F., ve Calvi, G. M. (1996). Seismic design and retrofit of bridges. Wiley.
- Zhao, C., Xiong, Z., ve diğerleri. (2021). Annual review of research on bridge engineering in 2020. Advances in Bridge Engineering, 2(1), 1–28.



## *BÖLÜM 15*

# Sanal Gerçeklikte Yapay Zekâ Destekli Etkileşim Tasarımı ve Bilişsel Yük

*Samet Alan<sup>1</sup>*

## GİRİŞ

Sanal gerçeklik (VR) tabanlı öğrenme ortamları, son yıllarda hızlı bir gelişme göstererek geleneksel insan-bilgisayar etkileşimi (HCI) sistemlerini ve eğitim tasarım yapılarını dönüştürmektedir. Sürükleyici arayüzler ve yapay zeka destekli etkileşim mekanizmaları aracılığıyla, yeni öğrenme deneyimi ve kullanıcı katılımı biçimleri oluşturulmaktadır. Tarihsel olarak, etkileşimli sistemlerin değerlendirilmesi öncelikle ekran tabanlı kullanılabilirlik modellerine ve standart etkileşim ölçütlerine dayanmıştır. Bununla birlikte, sürükleyici VR teknolojilerinin yükselişi, üç boyutlu ortamlarda kullanıcı bilişselini, dikkatini ve etkileşim karmaşıklığı doğru bir şekilde yakalamada zorluklar yaratmıştır.

Sürükleyici sistem geliştirmenin erken örnekleri arasında, 1990'larda bilgisayar tabanlı simülasyon ortamlarının ortaya çıkması ve 2000'lerde etkileşimli 3D uygulamalarının ve sanal eğitim sistemlerinin genişlemesi yer almaktadır. VR donanımı, gerçek zamanlı işleme teknolojileri ve yapay zeka odaklı etkileşim modelleri geliştikçe, kullanıcı-sistem etkileşiminin karmaşıklığı önemli ölçüde artmıştır (Sherman ve Craig 2003). Sürükleyici öğrenme ortamlarının sürekli gelişmesiyle birlikte, kullanıcı deneyimini daha iyi anlamak ve optimize etmek için yeni tasarım ve analitik yaklaşımlar gerekli hale gelmektedir.

Bu gelişmenin bir örneği, kullanıcı etkileşim kalıplarını gerçek zamanlı olarak değerlendiren yapılandırılmış HCI çerçevelerinin ve yapay zeka tabanlı uyarlanabilir sistemlerin kullanımınıdır. Bu sistemler, sürükleyici ortamlarda insan bilişsel sınırlamalarını yansıtan dinamik ve bağlam duyarlı öğrenme ortamları sağlamaktadır.

Bu çalışma, yapay zeka destekli etkileşim tasarımının; sanal gerçeklik tabanlı öğrenme ortamlarında, bilişsel yükü anlama ve azaltmadaki rolünü araştırmaktadır. Sanal gerçeklik tabanlı insan-bilgisayar etkileşim sistemlerinin geliştirilmesi, değerlendirilmesi ve analizini inceleyerek, çalışma etkileşim tasarımı, bilişsel yük ölçümü ve uyarlanabilir öğrenmeye yönelik mevcut

---

<sup>1</sup> Mezun Araştırmacı, La Trobe Üniversitesi, Victoria Australia  
ORCID: 0000-0001-5718-3918

yaklaşımları ele almaktadır. Amaç, uyarlanabilir tasarım mekanizmalarının sürükleyici eğitim ortamlarında etkileşim verimliliğini, kullanıcı deneyimi kalitesini ve bilişsel sürdürülebilirliği nasıl iyileştirebileceğine dair yapılandırılmış bir analiz sunmaktır.

## **SANAL GERÇEKLIK TABANLI İNSAN-BİLGİSAYAR ETKİLEŞİM SİSTEMLERİNİN GELİŞİMİ**

1990'lardan bu yana sanal gerçeklik (VR) tabanlı insan-bilgisayar etkileşimi (HCI) sistemlerinin gelişimi hızla ilerleyerek insanların dijital ortamlarla etkileşim biçimini yeniden şekillendirdi. İlk VR araştırmaları, kontrollü laboratuvar ortamlarında görselleştirme ve eğitim için kullanılan temel simülasyon sistemlerine odaklandı (Radanliev 2025). En eski örneklerden biri, NASA'nın astronotlar için VR tabanlı eğitim simülasyonlarıdır; bu simülasyonlar, sürükleyici ortamların kontrollü koşullar altında karmaşık görev öğrenimini nasıl destekleyebileceğini göstermektedir (NASA, 1995). Bu erken sistemler etkileşim açısından sınırlı olmakla birlikte sürükleyici HCI araştırmaları için temel oluşturdu.

1990'ların sonlarında ve 2000'lerin başlarında, 3D grafik motorlarının ve etkileşimli simülasyon araçlarının geliştirilmesi, VR yeteneklerini önemli ölçüde genişletti. Unreal Engine (1998) ve Unity (2005) gibi oyun motorları, geliştiricilerin daha karmaşık etkileşimli ortamlar oluşturmasını sağlamaktadır. Bu dönemde, VR uygulamaları eğitim ve endüstriyel eğitim bağlamlarında ortaya çıkmaya başladı. Örneğin, tıp fakülteleri tarafından, öğrencilerin karmaşık insan vücudu yapılarını geleneksel 2 boyutlu ders kitaplarından daha etkili bir şekilde anlamalarına yardımcı olmak için 3 boyutlu anatomik simülasyon sistemleri kullanılmaya başlandı (Moro, Stromberga, Raikos ve Stirling 2017). Buradan hareketle, etkileşim tasarımı büyük ölçüde bilişsel verimlilikten ziyade navigasyon ve nesne manipülasyonuna odaklanmaya devam etti.

2010'lu yıllarda, Oculus Rift (2016 ticari sürümü) ve HTC Vive gibi tüketici sınıfı VR cihazlarının piyasaya sürülmesi, sürükleyici sistemlerin yaygın olarak benimsenmesini sağladı. Bu teknolojiler, kullanıcıların hareket izleme ve mekansal etkileşim tekniklerini kullanarak tamamen sürükleyici ortamlarla etkileşim kurmasına olanak tanıdı. Örneğin, VR eğitim sistemleri, pilotların güvenli sanal ortamlarda acil durum senaryolarını uygulayabileceği havacılık ve askeri simülasyonlarda kullanılmaya başlandı (Gavish, Webel, Rodriguez, Peveri, Bockholt ve Tecchia 2015). Bununla birlikte, sürükleyicilik arttıkça, kullanıcılar karmaşık duyuşal girdi ve etkileşim talepleri nedeniyle daha yüksek bilişsel yük seviyeleri yaşamaya başladı.

Aynı zamanda, yapay zeka (AI) sistemleri VR ortamlarına entegre edilmeye başlandı. Makine öğrenmesi algoritmaları, kullanıcı davranışını izlemek, etkileşim kalıplarını tahmin etmek ve sistem yanıtlarını gerçek zamanlı olarak ayarlamak için kullanıldı. Örneğin, Microsoft'un yapay zeka destekli eğitim

araçları gibi uyarlanabilir öğrenme platformları, sistemlerin kullanıcı performansına ve dikkat seviyelerine göre içeriği nasıl kişiselleştirebileceğini gösterdi. Sanal gerçeklik ortamlarında, etkileşim görevleri sırasında gereksiz bilişsel çabayı azaltmak için benzer yaklaşımlar uygulanmaya başlandı (Holmes, Bialik, ve Fadel, 2019).

Bir diğer önemli gelişme ise, gerçek dünya öğrenme ortamlarını simüle eden sanal gerçeklik tabanlı eğitim platformlarının ve sanal kampüs sistemlerinin ortaya çıkmasıdır. Stanford ve MIT gibi üniversiteler, öğrencilerin sanal derslere katılabilecekleri ve 3 boyutlu içerikle etkileşim kurabilecekleri sürükleyici öğrenme ortamlarıyla denemeler yaptı. Bu sistemler, sanal gerçekliğin deneyimsel öğrenme potansiyelini gösterirken, aynı zamanda son derece sürükleyici ortamlarda kullanıcı odağını koruma ve bilişsel aşırı yüklenmeyi önleme konusunda karşılaşılan zorlukları da vurgulamaktadır.

Sanal gerçeklik sistemleri daha karmaşık hale geldikçe, araştırmacılar sürükleyici ortamlardaki bilişsel yükü anlamaya giderek daha fazla odaklanmaktadır. İnsan-bilgisayar etkileşimi alanındaki çalışmalar, aşırı görsel uyarıların, etkileşim karmaşıklığının ve kötü tasarlanmış arayüzlerin öğrenme performansını önemli ölçüde azaltabileceğini göstermektedir (Sweller, 2011). Sonuç olarak, bilişsel yük ölçüm teknikleri ve uyarlanabilir etkileşim tasarımı stratejileri, VR araştırmalarında merkezi konular haline gelmiştir.

Modern VR tabanlı insan-bilgisayar etkileşimi (HCI) sistemleri, uyarlanabilir sürükleyici ortamlar oluşturmak için etkileşim tasarımı, bilişsel bilimi ve yapay zekayı bir araya getirmektedir. Bu sistemler, kullanıcı davranışına ve bilişsel durumuna bağlı olarak arayüz karmaşıklığını dinamik olarak ayarlamayı amaçlamaktadır. Örneğin, göz izleme ve biyometrik sensörler, deneysel VR sistemlerinde kullanıcının bilişsel yükünü gerçek zamanlı olarak tahmin etmek için kullanılmaktadır (Dede, 2009). Bu bağlamda, VR tabanlı öğrenme ortamları, kullanıcı deneyimini, öğrenme verimliliğini ve bilişsel sürdürülebilirliği optimize eden uyarlanabilir sistemler olarak giderek daha fazla tasarlanmaktadır.

## **VR TABANLI İNSAN-BİLGİSAYAR ETKİLEŞİMİ DEĞERLENDİRME**

Sanal gerçeklik (VR) sistemlerindeki insan-bilgisayar etkileşimi (HCI) değerlendirme çerçeveleri, Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE), Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) ve Bilgisayar Makineleri Birliği'nin Bilgisayar Sistemlerinde İnsan Faktörleri Konferansı (ACM CHI) topluluğu gibi akademik kuruluşların araştırmalarıyla şekillenmektedir. Bu çerçeveler, sürükleyici ortamlarda kullanılabilirlik, etkileşim kalitesi, öğrenme performansı ve bilişsel yükü değerlendirmek için yapılandırılmış yöntemler sunmaktadır. Yaygın göstergeler arasında görev tamamlama süresi, hata oranları, bakış davranışı, etkileşim sıklığı ve kullanıcı katılım metrikleri yer almaktadır (Wesley 2004).

Buna paralel olarak, Meta Quest, Unity ve Microsoft Mixed Reality gibi endüstri platformları, etkileşim verilerinin toplanabileceği ve analiz edilebileceği büyük ölçekli ortamlar sağlamaktadır. Akademik çerçeveler ve endüstriyel ekosistemler birlikte, VR tabanlı insan-bilgisayar etkileşim sistemlerinde bilişsel verimliliğin, kullanılabilirliğin ve öğrenme sonuçlarının sistematik olarak değerlendirilmesini desteklemektedir.

### **Meta Reality Labs - Sanal Gerçeklik Etkileşimi ve Davranış Analizi**

Meta Reality Labs'ın VR ekosistemi (Meta Quest platformu), sanal gerçeklikte kullanıcı davranışını incelemek için en kapsamlı sistemlerden biridir. Sistem düzeyinde telemetri (kullanıcı etkileşim verilerinin otomatik olarak toplanması) yoluyla, hareket kalıpları, etkileşim sıklığı, bakış davranışı (kullanıcıların nereye baktığı) ve sürükleyici ortamlardaki görev performansı gibi bilgileri kaydetmektedir (Slater, 2009). Bu veriler, etkileşim kalıplarını, bilişsel yükü (bir görevi yerine getirmek için gereken zihinsel çaba) ve kullanılabilirlik sorunlarını tespit etmek için makine öğrenme modelleri (verilerdeki kalıpları belirleyen yapay zeka sistemleri) kullanılarak analiz edilebilmektedir. Bulgular, davranışsal eğilimleri ve etkileşim zorluklarını belirlemek için kullanılabilir ve kullanıcıların ihtiyaçlarına ve davranışlarına yanıt veren uyarlanabilir sanal ortamların geliştirilmesini desteklemektedir.

Bu altyapı, yalnızca ürün optimizasyonu için değil, aynı zamanda gerçek dünya ortamlarında VR tabanlı eğitim ve öğrenme etkinliğinin değerlendirilmesi için de yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, Meta Quest platformu üzerine kurulu kurumsal ve eğitimsel VR uygulamaları, sürükleyici koşullar altında kullanıcı adaptasyonu, görev verimliliği ve etkileşim karmaşıklığını değerlendirmek için analiz edilmektedir. Geliştiriciler ve araştırmacılar tarafından, bu bilgileri arayüz tasarımını iyileştirmek, gereksiz bilişsel yükü azaltmak ve sistem yanıt verme hızını artırmak için kullanılmaktadır. Meta'nın VR analitik ekosistemi, insan-sistem etkileşim davranışının büyük ölçekte sistematik olarak gözlemlenmesini sağlayarak daha uyarlanabilir ve bilişsel olarak verimli VR ortamlarının geliştirilmesini desteklemektedir.

### **OpenXR - Sanal Gerçeklikte Göz Takibi Bilişsel Yük Analizi**

Sanal gerçeklik ortamlarındaki göz takip sistemleri, sürükleyici görevler sırasında kullanıcı davranışını analiz etmek için Tobii göz takibini OpenXR tabanlı etkileşim platformlarıyla entegre etmektedir (Duchowski, 2017). Bu sistemler, dikkat akışını ve bilişsel yükü gerçek zamanlı olarak ölçmek için bakış konumunu, sabitleme süresini ve görsel geçişleri izlemektedir.

Araştırmacılar, göz hareketi verilerini denetleyici girdileri ve mekansal gezinme modelleriyle entegre ederek, sürükleyici görevler sırasında etkileşim zorluğu, kafa karışıklığı ve artan bilişsel talep anlarını tespit edebilir. Eğitim ve mesleki eğitimde sanal gerçekliğin benimsenmesi arttıkça, bu insan-bilgisayar



etkileşimi araçları, tasarımcıların ve araştırmacıların arayüz verimliliğini değerlendirmelerine, bilişsel zorlanmayı azaltmalarına ve veri odaklı optimizasyon yoluyla etkileşim tasarımını iyileştirmelerine yardımcı olabilmektedir.

## **VR TABANLI ETKİLEŞİM ANALİZİ VE BİLİŞSEL PERFORMANS ÖLÇÜMÜ**

Sanal gerçeklik (VR) tabanlı insan-bilgisayar etkileşim sistemlerinin standartlaştırılmış değerlendirmesi, Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) 9241 ve Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE) kullanılabilirlik kılavuzları gibi uluslararası kabul görmüş çerçeveler tarafından desteklenmektedir. Bu çerçeveler, sürükleyici ortamlarda etkileşim verimliliğini, görev performansını, öğrenme etkinliğini ve bilişsel iş yükünü ölçmek için yöntemler sunmaktadır (ISO, 2018).

Uygulamada, bu ölçümler giderek artan bir şekilde VR platformlarından toplanan davranışsal analizlerle desteklenmektedir. Görev tamamlama oranları, hata sıklığı, bakış davranışı ve hareket kalıpları gibi performans göstergeleri, araştırmacıların ve geliştiricilerin etkileşim kalitesini değerlendirmelerine ve kullanılabilirliği ve bilişsel verimliliği iyileştirme fırsatlarını belirlemelerine olanak tanınmaktadır.

## **VR TABANLI ETKİLEŞİM VERİSİ TOPLAMA VE DAVRANIŞ ANALİZİ**

Sanal gerçeklik (VR) tabanlı insan-bilgisayar etkileşim sistemlerinde veri toplama, telemetri (kullanıcı etkileşim verilerinin otomatik olarak toplanması) mekanizmalarına, uygulama programlama arayüzlerine (API'ler), sensör teknolojilerine ve kontrollü kullanıcı çalışmalarına dayanmaktadır. Bu yaklaşımlar, hareket kalıpları, nesne manipülasyonu, bakış aktivitesi, navigasyon davranışı ve görev performansı gibi davranışsal göstergeleri yakalamaktadır (MacKenzie 2013).

Elde edilen veri kümeleri, araştırmacıların sürükleyici öğrenme ve simülasyon ortamlarında kullanıcı katılımını, etkileşim verimliliğini ve bilişsel yükü incelemelerini sağlar. Bu davranışsal kalıpları analiz ederek, tasarımcılar kullanılabilirlik sorunlarını belirleyebilmekte ve, öğrenme etkinliğini ve genel kullanıcı deneyimini iyileştiren daha uyarlanabilir etkileşim stratejileri geliştirebilmektedirler.

## **SANAL GERÇEKLİKTE YAPAY ZEKA DESTEKLİ ETKİLEŞİM TASARIMI VE BİLİŞSEL YÜK ÖLÇÜMÜNÜN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI**

Yapay zekanın ve sanal gerçeklik tabanlı insan-bilgisayar etkileşim sistemlerinin entegrasyonu, öğrenme verimliliğini, kullanıcı katılımını ve

uyarlanabilir etkileşim tasarımı iyileştirmek için önemli fırsatlar yaratmıştır. Aynı zamanda, bu teknolojiler dikkatlice değerlendirilmesi gereken teknik, etik ve operasyonel zorluklar da ortaya çıkarmaktadır. Tablo 1, sürükleyici öğrenme ortamlarında yapay zekâ destekli etkileşim tasarımı ve bilişsel yük ölçümünün başlıca avantajlarını ve dezavantajlarını özetlemektedir.

Tablo 1. Sanal Gerçeklikte Yapay Zekâ Destekli Etkileşim Tasarımı ve Bilişsel Yük Ölçümünün Avantajları ve Dezavantajları

| Avantajlar                                                                                        | Dezavantajlar                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Kullanıcıların Bireysel İhtiyaçları:</i> Uyarlanmış, esnek öğrenme sağlar. deneyimleri sağlar. | <i>Büyük Veri İhtiyacı:</i> Davranışsal ve etkileşim verisi gerektirir.                       |
| <i>Akıllı Arayüz Uyarlaması:</i> Gereksiz bilişsel yükü azaltır.                                  | <i>Veri Toplama:</i> Gizlilik ve etik kaygılarını gündeme getiriyor.                          |
| <i>Dinamik Etkileşim Mekanizmaları:</i> Kullanıcı katılımını ve motivasyonunu artırır.            | <i>Yapay zeka Tahminleri:</i> Kullanıcının bilişsel durumlarını her zaman doğru vermeyebilir. |
| <i>Eğitim ve Öğretim Uygulamaları:</i> Sürekli performans izleme olanağı sunar.                   | <i>Maliyet:</i> Geliştirme ve uygulama ücretleri yüksek olabilir.                             |
| <i>Sürükleyici Görevler:</i> Kişiselleşmiş geri bildirim ve rehberlik sağlar.                     | <i>Aşırı Bağımlılık:</i> Erişilebilirliği ve ölçeklenebilirliği sınırlayabilir.               |

Kaynak: Sweller, 2011

Genel olarak, yapay zeka destekli etkileşim tasarımı, sanal gerçeklik ortamlarında bilişsel verimliliği ve öğrenme etkinliğini artırmak için önemli faydalar sunmaktadır. Bununla birlikte, başarılı bir uygulama, gizlilik, sistem şeffaflığı, teknik güvenilirlik ve davranışsal verilerin etik kullanımı konularının dikkatlice değerlendirilmesini gerektirir. Gelecekteki gelişmeler, sorumlu veri yönetimi ve kapsayıcı sistem tasarımı sağlarken, uyarlanabilir zekayı kullanıcı kontrolüyle dengelemeye odaklanmalıdır.

## **SANAL GERÇEKLİK TABANLI ÖĞRENME İÇİN ÖNERİLEN YAPAY ZEKA DESTEKLİ BİLİŞSEL ADAPTASYON ÇERÇEVESİ**

Bu bölümde ele alınan kavramlara dayanarak, sanal gerçeklik (VR) tabanlı öğrenme ortamları için kavramsal bir yapay zeka destekli bilişsel adaptasyon çerçevesi önerilmektedir. Çerçeve, öğrenme etkinliğini ve kullanıcı deneyimini iyileştirmeyi amaçlayan sürekli bir geri bildirim sistemine kullanıcı etkileşim verilerini, bilişsel yük değerlendirme mekanizmalarını, yapay zeka analizini ve adaptif arayüz tasarımı entegre eder.

Çerçeve dört birbirine bağlı katmandan oluşmaktadır:

## **1. Kullanıcı Etkileşim Katmanı**

Bu katman, kullanıcının sanal ortamla doğrudan etkileşimini temsil etmektedir. Etkileşim verileri, göz hareketlerini, bakış sabitleme kalıplarını, navigasyon davranışını, nesne manipülasyonunu, kontrol cihazı girişlerini, görev tamamlama etkinliklerini ve yanıt sürelerini içermektedir (Adhanom, MacNeilage ve Folmer 2023). Bu davranışsal sinyaller, sürükleyici öğrenme etkinlikleri sırasında kullanıcı katılımını ve bilişsel talepleri anlamak için temel oluşturmaktadır.

## **2. Bilişsel Analiz Katmanı**

Toplanan etkileşim verileri, kullanıcının bilişsel durumunu tahmin etmek için işlenmektedir. Dikkat kaymaları, uzun süreli odaklanma, artan hata oranları ve verimsiz gezinme kalıpları gibi göstergeler, artan bilişsel yükü işaret edebilir (Nasri 2024). Bilişsel analiz katmanı, çerçevenin değerlendirme bileşeni olarak işlev görür ve öğrenci performansı ve bilişsel verimlilik hakkında gerçek zamanlı bilgi sağlamaktadır.

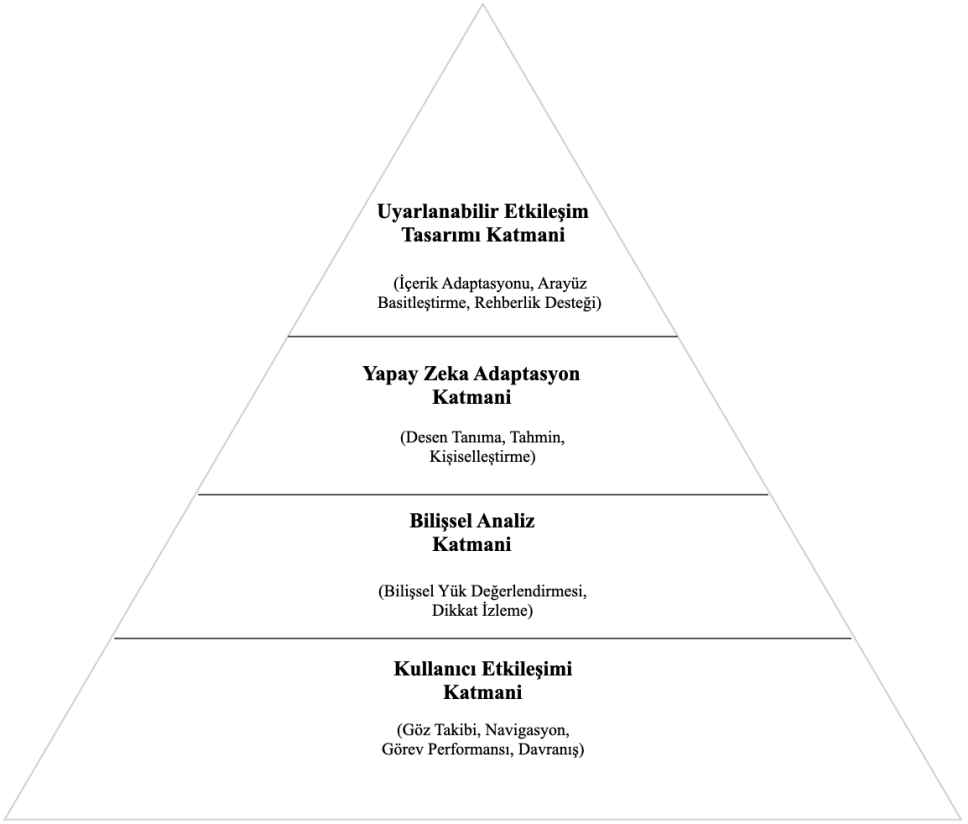
## **3. Yapay Zeka Uyarlama Katmanı**

Yapay zeka algoritmaları, öğrenme performansını etkileyebilecek kalıpları belirlemek için bilişsel ve davranışsal göstergeleri analiz etmektedir. Bu analizlere dayanarak, sistem potansiyel aşırı yüklenme durumlarını tahmin etmekte ve uygun uyarlama stratejilerini belirlemektedir. Makine öğrenme teknikleri, bireysel kullanıcı özelliklerine ve etkileşim geçmişine göre sistem yanıtlarını kişiselleştirmek için kullanılabilir (Holmes, Bialik ve Fadal 2019).

## **4. Uyarlanabilir Etkileşim Tasarımı Katmanı**

Yapay zeka tarafından oluşturulan önerilere dayanarak, sanal ortam arayüz karmaşıklığını, öğretim rehberliğini, içerik sunumunu ve etkileşim mekanizmalarını dinamik olarak ayarlamaktadır. Bu ayarlamalar, katılımı ve öğrenme etkinliğini korurken gereksiz bilişsel yükü azaltmayı amaçlamaktadır (Radianti 2020).

**Şekil 1:** VR Öğrenimi İçin Yapay Zeka Destekli Bilişsel Adaptasyon Çerçevesi



Kaynak: Nasri, 2025

Dört katmanlı bu modelin beklenen sonuçları arasında bilişsel yükün azalması, etkileşim kalitesinin iyileştirilmesi, öğrenme performansının artırılması, kullanıcı katılımının artırılması ve daha sürdürülebilir sürükleyici öğrenme deneyimleri yer almaktadır. Yapay zekayı bilişsel değerlendirme ve etkileşim tasarımı prensipleriyle bütünleştirerek, hem uyarlanabilir hem de kullanıcı merkezli geleceğin sanal gerçeklik öğrenme ortamlarının geliştirilmesi için yapılandırılmış bir yaklaşım sunmaktadır (Şekil 1).

## SONUÇ

Sanal gerçeklik teknolojileri, sürükleyici ve etkileşimli dijital ortamlar sağlayarak geleneksel insan-bilgisayar etkileşimini dönüştürmüştür. VR sistemleri temel simülasyon platformlarından akıllı uyarlanabilir ortamlara doğru evrildikçe, kullanıcı etkileşiminin ve bilişsel işlemlemenin karmaşıklığı artmıştır.

Sonuç olarak, bilişsel yükü anlamak ve yönetmek, etkili VR tabanlı öğrenme sistemlerinin tasarımında bir zorluk haline gelmiştir.

Bu çalışmada, VR tabanlı insan-bilgisayar etkileşim sistemlerinin tarihsel gelişimi incelenmiş ve etkileşim değerlendirmesi, davranışsal analiz, göz izleme teknolojileri ve bilişsel performans ölçümüne yönelik çağdaş yaklaşımları gözden geçirilmiştir. Uyarlanabilir etkileşim tasarımını desteklemede ve sürükleyici ortamlarda kullanıcı deneyimlerini optimize etmede yapay zekanın artan rolüne önem verilmiştir.

Analiz, yapay zeka destekli etkileşim sistemlerinin, arayüz karmaşıklığını ve eğitim içeriğini bireysel kullanıcı ihtiyaçlarına dinamik olarak uyarlayarak; öğrenme verimliliğini, kullanılabilirliği ve bilişsel sürdürülebilirliği artırabileceğini göstermektedir. Göz izleme, davranışsal analiz ve makine öğrenimi gibi teknolojiler, bilişsel talepleri belirlemek ve etkileşim kalitesini gerçek zamanlı olarak artırmak için değerli mekanizmalar sağlamaktadır (Duchowski 2017).

Bu avantajlara rağmen, gizlilik, veri yönetimi, ölçüm geçerliliği, uygulama maliyetleri ve etik hususlar konusunda zorluklar devam etmektedir. Gelecekteki araştırmalar, kişiselleştirmeyi kullanıcı özerkliğiyle dengeleyebilen şeffaf, kullanıcı merkezli ve etik açıdan sorumlu uyarlanabilir sistemler geliştirmeye odaklanmalıdır.

Sonuç olarak, yapay zeka, sanal gerçeklik ve insan-bilgisayar etkileşiminin birleşimi, yeni nesil sürükleyici öğrenme ortamları için umut vadeden bir yönü temsil etmektedir. Uyarlanabilir zekayı kanıta dayalı tasarım ilkeleriyle birleştirerek, gelecekteki VR sistemleri daha etkili, ilgi çekici ve bilişsel olarak sürdürülebilir eğitim deneyimleri yaratma potansiyeline sahiptir.

## KAYNAKÇA

- Adhanom, I. B., MacNeilage, P., & Folmer, E. (2023). Eye Tracking in Virtual Reality: A Broad Review of Applications and Challenges. *Virtual Reality*, 27(2), 1481–1505.
- Bailenson, J. N. (2018). *Experience on Demand: What Virtual Reality Is, How It Works, and What It Can Do*. W. W. Norton & Company.
- Bowman, D. A., Kruijff, E., LaViola, J. J., & Poupyrev, I. (2004). *3D User Interfaces: Theory and Practice* Addison-Wesley.
- Dede, C. (2009). Immersive interfaces for engagement and learning. *Science*, 323(5910), 66–69.
- Duchowski, A. T. (2017). *Eye tracking methodology: Theory and practice* (3rd ed.). Springer. *Ergonomics of human-system interaction*. ISO 9241-11:2018
- Duval, E. (2011). *Attention analytics and learning dashboards*.
- Gavish, N., Gutiérrez, T., Webel, S., Rodríguez, J., Peveri, M., Bockholt, U., & Tecchia, F. (2015). *Evaluating virtual reality and augmented reality training for industrial maintenance and assembly tasks*. Interactive Learning Environments IEEE/Elsevier publication.
- Han, E., & Bailenson, J. N. (2024). *Lessons for/in virtual classrooms: designing VR-based learning environments*.
- Holmes, W., Bialik, M., & Fadel, C. (2019). *Artificial Intelligence in Education: Promises and Implications for Teaching and Learning*. Center for Curriculum Redesign.
- MacKenzie, I. S. (2013). *Human-Computer Interaction: An Empirical Research*.
- Makransky, G., & Lilleholt, L. (2018). Cognitive load in VR learning environments. *British Journal of Educational Technology*.
- Morgan Kaufmann, (1995-1998) *NASA VR Training and Simulation Research Reports*, Ames Research Center)
- Moro, C., Štromberga, Z., Raikos, A., & Stirling, A. (2017). The effectiveness of virtual and augmented reality in health sciences education: A systematic review. *Anatomical Sciences Education*, 10(6), 549–559.
- Nasri, M. et al. (2025). *Towards Intelligent VR Training: A Physiological Adaptation Framework for Cognitive Load and Stress Detection*
- Nasri, M. et al. (2024). *Exploring eye tracking to detect cognitive load in complex VR training*.
- Oculus VR (2016). *Oculus Rift Consumer Edition Launch (CV1) - March 2016 release*.

- Radianti, J., Majchrzak, T. A., Fromm, J., & Wohlgenannt, I. (2020). A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education. *Computers & Education*, 147, 103778.
- Radanliev, P. et al. (2025). Privacy, ethics, transparency, and accountability in AI systems *Nature / PMC article*
- Sherman, W. R., & Craig, A. B. (2003). *Understanding Virtual Reality: Interface, Application, and Design*.
- Shneiderman, B. (2022). *Human-Centered AI*. Oxford University Press.
- Slater, M. (2009). Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments *Philosophical Transactions of the Royal Society*.
- Sweller, J. (2011). Cognitive load theory. *Psychology of Learning and Motivation*, Volume 55, Pages 37–76.
- Zawacki-Richter, O. et al. (2019). Systematic review of AI applications in higher education. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*.



## *BÖLÜM 16*



# Peynir Üretiminde Sürdürülebilir İnovatif Gelişmeler

*Kübra Arslan Kardaş<sup>1</sup> & Selda Bulca<sup>2</sup>*

## 1. GİRİŞ

Gıda teknolojisinde sürdürülebilirlik, genel anlamda doğada var olan kaynakların gelecek nesillerin ihtiyaçlarını karşılama olanaklarına zarar vermeden kullanımını sağlayacak şekilde uygulanması olarak tanımlanmaktadır. Sürdürülebilirliğin gıda üretiminde en önemli uygulama amaçları arasında sürekli artan dünya nüfusu, tüketiciye talepleri karşısında sağlıklı ve güvenli gıda üretimini sağlamak, kentsel ekonomi ve kentsel topluluklarda çeşitliliği ve canlılığı sağlamak, toprak, su ve biyoçeşitlilik gibi doğal kaynaklarda biyolojik sınırları kontrol etmek, atık ve kaynakların yönetimi, ambalajlama gibi nedenler sayılmaktadır. Gıda sektörünün en önemli bileşenlerinden biri olan süt özellikle de peynir teknolojisinde de sürdürülebilirliğin yaygın konuları arasında değerlendirilmektedir. Peynir üretiminde sürdürülebilirliğin sağlanmasını ve tüketici için özellikle duysal açıdan daha kaliteli alternatif bir peynir üretimini gerçekleştirmek çok önemlidir. Bu bağlamda ilk kriter çiğ sütün mikrobiyolojik, kimyasal ve fiziksel kalitesidir. Çiğ süt kalitesel anlamda incelendiğinde, mikrobiyolojik açıdan sütün insan sağlığı için güvenli olup olmadığı belirlenmektedir. Çünkü sütteki koliform varlığı ve yüksek bakteri yükü gıda zehirlenmesine neden olabilmektedir. Fiziksel kalite açısından da sütteki pH ve asitlik oranındaki değişimler sütün bozulmasında etkilidir. Kimyasal kalite ise protein, yağ, yağsız kuru madde ve laktik asit bileşenlerini inceleyerek, sütün besleyici değeri hakkında bilgi vermektedir (Yavaş & Karabekmez-Erdem, 2025; Opiyo, Kidega, Okello-Uma, & Olum, 2024)..

Bununla birlikte sütün işlenmesi, peynirin olgunlaştırılması, ambalajlanması, depolanması işlemi, sürdürülebilir gıda üretiminin vazgeçilmez temel unsurları arasındadır (Yavaş & Karabekmez-Erdem, 2025). İlk kriter çiğ sütün kalitesi olmasından dolayı sütün işlenmesi aşamasında ısıl işlemin güvenilirliği ve hijyenik kontrolü büyük bir önem taşımaktadır. Bu amaçla, en yaygın teknik olarak kullanılan yöntem ise sütün 72 °C’de 15 saniye ısıl işleme tabi tutulmasıyla gerçekleştirilen pastörizasyon tekniğidir (Rankin, Bradley, Miller, & Mildenhall, 2017).

Peynir üretiminde pastörize edilen sütün, 32 °C’de uygun sıcaklığa soğutulması üretimin kritik kontrol noktası açısından büyük bir önem

<sup>1</sup> Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, 0000-0002-4097-792X

<sup>2</sup> Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü, 0000-0001-7405-2872

taşımaktadır (Jones, 1999). Isıl işleme maruz bırakılan süt, hızlı bir şekilde 10 °C'nin altına soğutulmalıdır. Üretim aşamasında mikroorganizmanın gelişiminin önlenmesi konusunda süte uygulanan ısıl işlem kadar, üretim hatlarında kullanılan ekipmanların da temizliğine dikkat edilmesi gereklidir. Bu yüzden süt işleme aşaması üretim hatlarından geçilerek yapıldığı için, hatların ve kullanılan ekipmanların CIP (Yerinde Temizlik) yöntemi ile temizlenmesi gerekmektedir. Bunlar; sırasıyla; ön durulama, kimyasal deterjan ile yıkama, tekrar durulama, dezenfeksiyon işlemi uygulanmaktan ibarettir. Bu aşamada dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta ise; ekipmanların paslanmaz çelikten yapılmış olması, iç yüzeylerinin pürüzsüz olması ve herhangi bir çatlak durumunun olmaması gerektiğidir (Rankin vd., 2017). Sütün proseslenmesi esnasında da atık oluşumundan kaynaklı su ve toprak kirliliği, sera gazı emisyonlarının salınımı gibi karşılaşılan durumlar, çevresel sorunlara yol açmaktadır (Dodurka, Özmen & Çetin, 2023). Kullanılan çevre dostu uygulamalar sayesinde daha az besin kaybı meydana gelmekte, daha az enerji tüketilmekte ve süt ürünlerinin organoleptik özelliklerinde çok az değişiklik gözlemlenmektedir (Debnath, Roy, Debnath & Sanyal, 2022).

Besleyici değeri yüksek olan sütün, en eski fermente süt ürünlerinden biri olan peynire dönüştürülmesi ve daha kaliteli daha besleyici peynir üretiminin sağlanması açısından sürdürülebilirliğinin uygulanması aşamasında son yıllarda bazı inovatif yaklaşımlar ele alınmaktadır (Croguennec, Le Loir & Jeantet, 2025).

Bunlar arasında en yaygın olan yaklaşımlardan birisi, üretimde kullanılan starter kültürlerin çeşitliliğidir. Starter kültür kullanımı bağlamında çoklu bakteri, maya ve küflerden oluşan starter kültürler ile yenilikçi ürünlerin üretimi gerçekleştirilebilmektedir. İnovatif fermentasyon tekniğinde kullanılan çoklu mikroorganizmalar ile daha az oranda katkı maddesi içeren (clean label) etiketli gıdaların, probiyotik ürünlerin üretilmesi mümkündür (Gänzle vd., 2024). Kendi kendine parçalanabilen hücre yapısına sahip kültürler olarak adlandırılan otolitik starter kültürler ise peynirde proteinleri parçalayarak, aroma ve tadın kısa sürede oluşmasını sağlamaktadır (Şimşek, Gürsoy, Dalca & Yılmaz, 2016). Peynirde sürdürülebilirliğin sağlanmasındaki etkili bir diğer faktör ise peynirdeki amino asit ve aroma maddelerini açığa çıkaran enzimlerin kullanımıdır (McDonagh, O'Donovan, Moran & Ryan, 2024). Bu şekilde ayrıca, uygulanan yeni fermentasyon teknikleri de sektörün uzun vadede çevre dostu bir şekilde gelişmesine olanak tanımaktadır. Bu yenilikçi tekniklerin bütünleşik etkisi, geleneksel yöntemlerle kıyaslandığında daha az atık ve daha az kaynak kullanımı ile peynir üretimini mümkün kılmaktadır. Sürdürülebilirlik odaklı olan bu durum hem gezegenimizin geleceği hem de endüstrinin uzun vadeli rekabetçiliği için kritik bir önem taşımaktadır.

Özetle, bu çalışmada peynir üretiminin ve peynir üretiminde sürdürülebilirliği sağlayacak inovatif yaklaşımların, çevresel ve ekonomik etki üzerindeki faktörlerin değerlendirilmesi amaçlanmaktadır.

## 2. GELİŞME

### 2.1. Gıdalarda Sürdürülebilirlik

Gıda sürdürülebilirliği; günümüzdeki gıda ihtiyacı karşılanırken, gelecek nesillerin gıda güvenliğinin riske atılmadan gıda üretiminin yapılabilmesi durumudur. Gıdalarda sürdürülebilirliğin belirli amaçları bulunmaktadır. Bunlar; çevresel, sosyal ve ekonomik amaçlardır. Sera gazı emisyonlarını azaltmak, su ve doğal kaynak kullanımını azaltmak, gıda atıklarını azaltmak çevresel boyutta; çalışanlara sürdürülebilirlik konusunda bilgi vermek, toplumda farkındalık yaratmak sosyal boyutta iken; marka güvenilirliği kazanmak, maliyetleri düşürerek enerji verimliliği sağlamak ise ekonomik boyutta değerlendirilmektedir (Afshari vd., 2020; Gill, 2020).

### 2.2. Peynir Üretiminin Tarihi

Peynir, üretim geçmişi çok eskiye dayanan geleneksel bir süt ürünüdür ve üretimi yaklaşık 8000 yıl öncesine dayanmaktadır. Tarımın ve hayvancılığın başladığı dönemde peynir de üretilmeye başlanmıştır. Peynirin ilk üretim yönteminin hayvanların mide zarındaki rennet enziminin sütü sıcak ortamda spontan olarak fermente ederek, sütü pıhtılaştırması gibi doğal süreçlere dayandığı belirtilmektedir.

Peynir üretiminde rennet olarak bilinen peynir enziminin kullanılması, starter kültürlerin geliştirilmesi, gıda biliminin ilerlemesi ile kontrollü bir üretim sürecine girilmiştir. Ayrıca zamanla farklı süt türlerinin kullanımı (koyun, keçi, manda, deve vs.) farklı tuzlama teknikleri, farklı peynir muhafaza yöntemlerinin kullanılmasıyla birbirinden farklı peynir çeşitleri de ortaya çıkmıştır.

Teknolojinin gelişmesiyle peynir verimini yükseltmek adına 1960' lardan beri farklı membran teknolojilerinin kullanılmasıyla peynir üretiminde süt bileşiminin kontrol edilerek sütün protein oranı artırılmıştır (Johnson, 2017; Bihola vd., 2025). Bunların yanısıra günümüzde peynir üretim fabrikalarında immobilize rennet, probiyotik peynirlerle, 3D yazıcıyla peynir üretimi gibi modern teknolojiler kullanılmaktadır.

İmmobilize rennet, özel bir taşıyıcı materyale bağlanarak süte eklenmektedir. Böylece; aynı rennet birçok kez kullanılabilmekte ve bu şekilde enzim aktivitesi daha kontrollü olmaktadır. Yapılan çalışmada immobilize rennet ile feta peyniri üretimi yapılmış ve enzimin yedi güne kadar stabil çalıştığı gözlemlenmiştir. Peynir üretimindeki bir diğer modern teknolojilerden biri olan probiyotik kültür kullanımıyla bunların peynir üzerindeki etkinliğinin araştırıldığı çalışmalardır. Örneğin; mozzarella gibi peynirlerin pıhtısı sıcak suda haşlandığı için probiyotiklerin çoğunluğu sıcak suda etkinliğini kaybedebilmektedir. Bu yüzden probiyotiklerin etkinliğinin gösterilebilmesi için üretim koşullarında değişikliğe gidilmiştir. Örneğin, mozzarella peyniri için sıcak suda çekme sıcaklığı 80°C yerine 65–70 C'ye düşürülmüş, süre de 10 dakika yerine 5–7 dakika'ya düşürülmüştür.

Probiyotiklerden peynir üretiminde yararlanmanın diğer bir yolu ise başlangıçta ilave edilecek probiyotik konsantrasyonunun artırılmasıdır. Probiyotiklerin peynir altı suyu proteini konsantrasyonunda (WPC) daha fazla çoğaldığı bilinmektedir. Bu nedenle probiyotiklerin gelişmesi WPC içeren ortamda yürütülebilmektedir. Peynir üretiminde kullanılan inovatif tekniklerden birisi de 3D yazıcı teknolojisidir. Bu uygulama sayesinde; peynir püre kıvamına getirilmekte, makinede ince tabakalar halinde üst üste konularak, peynire istenilen şekil verilebilmektedir. Bu kullanılan teknolojiye peynirin pH değeri, türü ve olgunluk derecesi önem taşımaktadır. Çünkü peynirin pH değerinin artması, yumuşak ve akışkan olması peynirin üç boyutlu olarak yazdırılmasını kolaylaştırdığı rapor edilmiştir (Bihola vd., 2025).

### 2.3. İnovatif Fermantasyon Teknikleri ve Mikrobiyal Çözümler

Endüstriyel fermente gıda üretimi, fermantasyon esnasında mikrobiyal gelişmenin kontrol edilmesine, ürünün kalitesinin standartlaştırılmasına ve kullanılan starter kültürlerle dayanmaktadır. Starter kültür ile çalışılırken; mikroorganizmaların genetik ve probiyotik potansiyeline, aroma ve tekstür oluşturma kapasitesine dikkat edilmektedir.

İnovatif fermantasyon tekniğinde, farklı mikroorganizmaların kullanılarak lezzet, aroma ve dokunun artmasından dolayı tekli kültür yerine çoklu mikroorganizma kültürleri kullanılmaktadır. Fermantasyon esnasında aroma bileşenlerinin büyük bir kısmı mayaların metabolik faaliyetleri sonucunda oluştuğu için maya türleri bu aşamada kritik bir rol üstlenmektedir. Fermantasyon işleminde yaygın olarak kullanılan *Saccharomyces cerevisiae* ile sınırlı olmayan yeni mantar türleri gibi hibrit türler keşfedilerek yenilikçi ürünler geliştirilmektedir. Yenilikçi ürünler, aromayı zenginleştirmede önemli bir yer tutmaktadır. İnovatif fermantasyon teknikleri sadece mikroorganizmalar ile değil, fermente edilen substratın genişlemesi ile de ilişkilidir. Yani, geleneksel süt ve tahıl bazlı hammaddelerin ötesine geçilerek bitki bazlı sütler, tarımsal yan ürünler ve tamamen yeni gıda matrislerinin fermantasyon süreçlerine entegre edilmesiyle substratın genişletilmesinin önemi vurgulanmıştır. Belirlenen substratta hangi mikroorganizmanın etkin olup olmadığını belirlemek için substrata özgü kültür seçimini de doğru yapmak gerekmektedir. Kültür seçimi, kültürün mikrobiyal genomik özellikleri, toksin oluşturup oluşturmama durumları, aroma ve tekstür oluşturma kapasiteleri, probiyotik kaynaklı faydaları dikkate alınarak yapılmaktadır. Mantar ve bakteri türleri de starter kültür olarak kullanılabilir. Bu yüzden starter kültürler; çoklu bakteri, maya ve küf kombinasyonlarından oluşmaktadır. Substrat ve substrata uygun kültür seçiminin doğru bir şekilde uygulanması fermantasyon sürecini de kararlı hale getirmektedir. Mikroorganizmaların fermantasyon sürecinin gözlemlenebilmesi için de kullanılan bazı teknolojik yöntemler mevcuttur. Bunlar; mikroorganizmanın genetik potansiyelini belirleyen genomik, fermantasyon sırasında genlerin aktiflik durumunu inceleyen transkriptomik, aroma, tat, organik asit, uçucu bileşik profillerini inceleyen metabolomik yöntemlerdir.

Genomik durum, mikroorganizmanın genetik potansiyelini incelemektedir. Mikroorganizmanın peynirde hangi enzimleri üretebileceğini, hangi maddeleri oluşturabileceğini (asit, aroma oluşturma vb.) gözlemlemektedir. Transkriptomik durum da mikroorganizmanın o anda hangi genleri çalıştırdığını incelemektedir. Örneğin, peynir üretim aşamasındaki fermentasyonun belirli bir gününde peynirde kokuşma olduğu tespit edildiğinde mikroorganizmanın hangi reaksiyonu başlattığı takip edilebilmektedir. Metabolik durum ise, fermentasyon sonucunda hangi ürünlerin açığa çıktığını, açığa çıkan bu son ürünlerin (organik asitler, uçucu bileşikler vb.) peynirin kalitesini ne ölçüde etkilediğini araştırmaktadır.

İnovatif fermentasyon; gıda atıklarının değerli ürünlere dönüştürülmesini, besin değerini artıran fermente ve daha az oranda katkı maddesi içeren etiketli gıdaların, probiyotik ürünlerin üretilmesini hedeflemektedir (Gänzle vd., 2024).

### 2.3.1. Otolitik Starter Kültürler

Peynir yapımında kullanılan otolitik starter kültürler, kendi kendine parçalanabilen hücre yapısına sahip kültürlerdir. Bunlar peynir üretiminde kullanılan olgunlaşma sürecinde kendi kendine hücre duvarını parçalayarak hücre içi enzimleri serbest bırakan bakteri kültürüdür. Bu serbest enzimler; peynirde proteinlerin parçalanmasını, böylece aroma ve tat oluşumunu kısa sürede sağlamaktadır (Şimşek vd., 2016).

Otolitik starter kültürün normal starter kültürden farkı, asit üreterek olgunlaşmayı hızlandırması ve üretim sonrası olgunlaşma sürecinde de etkinliğini sürdürüyor olmasıdır. Çünkü normal starter kültürler başlangıç aşamasında kritik önem taşıırken, otolitik starter kültürler hem başlangıç hem de olgunlaştırma süreci boyunca kritik önem taşımaktadır.

Yapılan bir çalışmada da, otolitik özellik bakımından üç farklı starter kültür sistemi kullanılarak Cheddar peyniri üretilmiştir. Kullanılan starter sistemi; Sistem A olarak nitelendirilen düşük otoliz özellik gösteren iki *Lactococcus lactis* suşu (223 ve 227), Sistem B olarak nitelendirilen, A sistemine ilave edilen yüksek otoliz özelliği gösteren *Lactobacillus helveticus* DPC4571, sistem C olarak nitelendirilen sadece yüksek otoliz özelliği gösteren *L. Helveticus* DPC4571 suşundan oluşmuştur. Peynirdeki olgunlaşma sürecindeki değişimlerde bu üç sistemin etkisi incelenmiştir. Özellikle sistem C'nin yüksek oranda otoliz özellik gösterdiği, yani hücre duvarının parçalanma oranının sırasıyla  $C \gg B > A$  şeklinde olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada otolitik starter sistemlerinin peynirin olgunlaşma sürecini hızlandığı, proteoliz işlemi ile peynirdeki aroma gelişiminin daha kısa sürede gerçekleştiği sonucuna varılmıştır (Hannon vd., 2023). Peynirin olgunlaşma hızını belirleyen etmen, starter laktik asit bakterilerinin otoliz yoluyla parçalanması ve hücre içi peptidazların açığa çıkmasıdır. Peptidazlar, aroma oluşumunda etkili olan serbest aminoasitlerin ortaya çıkmasını sağlamaktadır.

Yapılan başka bir çalışmada, *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* bv. *diacetylactis* SD96 suşu kullanılarak, ERC isimli starter kültür karışımı oluşturulmuştur. ERC

kültürü, ticari starterlere kıyasla daha fazla serbest aminoasit salınımı sağlamaktadır. Örneğin, ERC kültürü ile Danbo peynirinin 25 haftalık olgunlaşma süresi %50 oranında kısaltılmıştır (Zhao, Tadesse, Gu & Solem, 2025).

Yukarıda da belirtildiği gibi otolitik starter kültürünün kullanılması ile peynirin olgunlaşma süresi kısaltılmakta; bu durum ise üretim maliyetini azaltarak, ürünün depolama süresi açısından avantajlar sağlamaktadır. Ürüne uygun olarak seçilmiş otolitik starter kültürler ile peynirde istenen tat ve aroma hissi istenilen şekilde kontrol edilebilmekte, bu sayede peynirin kalitesi de artırılabilir (Hannon vd., 2023).

### 2.3.2. Yüzey pH Modülasyonu ile Hızlı Olgunlaşma

Peynir üretiminde peynir kalitesinin korunarak, olgunlaştırma sürecinin hızlandırılması, verimliliğin artırılması ve yan ürünlerin ya da artık ürünlerin azaltılarak sürdürülebilir bir peynir üretimi gerçekleştirmek mümkün olmaktadır.

Yüzey pH modülasyonu ile hızlı olgunlaşmanın sağlanabilmesi için peynir yüzeyinde pH optimize edilerek enzimlerin hızlı bir şekilde çalışması sağlanmakta ve bu şekilde olgunlaşma başlatılmaktadır. Peynir yüzeyinin pH'sı düşük olduğu için pH'ın yükseltilerek lipaz ve proteaz enzimlerinin hızlı çalışması; peptit, aminoasit ve yağ asitlerinin açığa çıkması, aroma bileşiklerinin daha erken gelişmesi sağlanmaktadır. Yüzey pH modülasyonu sayesinde aroma ve doku gelişimi daha erken görülmekte, olgunlaşma süresi kısaltılmakta, depolama süresi azalmaktadır (Zhao vd., 2025).

Yapılan bir çalışmada, yumuşak peynirlerde *Debaryomyces hansenii* mayasının yüzeyde laktatı tüketerek pH'ı yükselttiği (deasidifikasyon), böylece peynirde olgunlaşmanın hızlandığı tespit edilmiştir. Burada peynirin olgunlaşma yönteminin doğrudan yüzey pH modülasyonu ile ilgili olduğu belirtilmiştir. Yapılan çalışmada yüzey pH'sı yaklaşık 4,8 civarında sabit kalmış ve maya henüz büyüme evresine girmemiştir. *D. Hansenii* 4. günden itibaren, laktatı metabolize etmeye başlamış, bunun sonucunda yüzey pH'sı hızla yükselmiştir. Ph 4,8 'den 6,8'e yükselmiştir. Bu şekilde yükselen pH doğrudan olgunlaşma hızının artmasına yol açmıştır. Yüzeyde laktatın tüketilmesi, pH artışını sağlamış, kabuk çevresinde proteoliz ve doku yumuşaması gerçekleşmiş ve olgunlaşma hızlanmıştır (Bonaïti, Leclercq-Perlat, Latrille, & Corrieu, 2004).

Yapılan bir başka çalışmada ise yüzeyden olgunlaşan peynirlerde yüzey pH'sının yükseltilerek olgunlaşma aşamasının hızlandığı gözlemlenmiştir. Peynirin yüzeyindeki pH değeri yaklaşık 4-5 arasında olduğu için mikroorganizmaların çalışması yavaş ilerlemektedir. Bu yüzden peynirin yüzeyine özel mikroorganizmalar sürülmüş ve pH'ın yükseldiği gözlemlenmiştir. Çalışmada örneğin; Tilsit peynirinin yüzeyine smear kültürü ilave edilmiştir. Kültürün ilave edilmesinden iki gün sonra, mikroorganizmaların hızlıca çoğaldığı, pH'ın 6'nın üzerine çıktığı, yüzeyde renk değişiminin olduğu tespit edilmiştir. Fakat, bu yöntem yalnızca yüzeyden olgunlaşan peynirler için geçerlidir (Bockelmann, Hoppe-Seyler, Jaeger, & Heller, 2000).

### 2.3.3. Yeni Aroma ve Olgunlaştırma Yöntemleri

Peynir teknolojisinde sadece üretim değil, aynı zamanda peynirin aroma ve tat kompozisyonu kalite açısından büyük bir önem taşımaktadır. Peynirin doğal olgunlaşma sürecinde uzun süren tat oluşumunu daha kısa sürelerle indirmek için peyniri hızlı olgunlaştıran enzimler, belirli mikroorganizmalar, kısa sürede aroma oluşturan teknikler kullanılmalıdır. Peynirin tadı ve kokusu peynirin olgunlaşması sayesinde oluşmaktadır. Geleneksel olgunlaşma uzun ve kontrollü bir süreç olmasından dolayı yeni aroma ve olgunlaştırma teknikleri geliştirilmiştir.

Yapılan bir çalışmada peynirde yeni aroma ve olgunlaştırma çalışmaları üzerinde durulmuştur. Belirli teknolojik yöntemlerin aroma ve olgunlaşması üzerine etkisi incelenmiştir. Uygulanan yöntemler arasında sırasıyla peynir; proteaz, lipaz ve diğer aroma oluşturan enzimlerle kontrollü hidrolize edilerek, olgunlaşmada enzim modifikasyonu ile hızlı bir aroma oluşturulmuştur. Kısa sürede olgun bir peynir tadı elde edilmiştir. Bir diğer yöntem; genetiği düzenlenmiş starter kültürlerle yeni aroma bileşikler elde etmek olmuş ve bu yolla kompleks bir tat oluşumu gözlemlenmiştir.

Ayrıca, bu bağlamda probiyotik kültürlerin de aroma gelişimine etkisi incelenmiştir. *Lactobacillus* türlerinin diasetil, asetoin, laktik ve asetik asit üretimini artırdığı, peynirin olgunlaşma hızını yükselttiği belirtilmiştir.

Diğer taraftan EPS (Ekzopolisakkarit) gibi laktik asit bakterilerinin ürettiği polisakkaritlerin peynir aromasını iyileştirdiği ve peynirin raf ömrünü uzattığı belirtilmektedir. Bu metabolik ürünler, süt proteinleri ile etkileşime girerek protein ağını stabilize etmekte, viskoziteyi artırarak yağ hissi oluşturmakta, su kaybını önlemekte, aroma bileşiklerini stabilize ederek duysal kaliteyi artırmaktadır. Bunun EPS üreten kültürlerin, düşük yağlı peynirde aromayı koruduğu da yapılan çalışmalarda gözlemlenmiştir. Bunların, peynirin nemini koruyarak aromatik bileşiklerin kaybını azalttığı ve düşük yağlı peynire olgun bir tat verdiği bazı çalışmalarda rapor edilmiştir (Bihola vd., 2025).

### 2.3.4. Peynir Altı Suyunun Mikrobiyal Değerlendirilmesi

Peynir altı suyu, süt proteinlerinden (kazein) ayrışarak elde edilen sıvı kısımdır. Bileşiminde laktoz, protein, yağ ve mineral içermektedir. Özellikle içerdiği peynir altı suyu proteinleri gibi değerli bileşiklerinden dolayı katma değerli bir ürün elde edilebilmek için ürün mikrobiyal fermentasyon işlemine de tabii tutulabilmektedir.

Peynir altı suyu; laktik asit bakterileri, mayalar, asetik asit bakterileri ve bakteri selülozu sentezleyen bakteriler için besin açısından zengin bir fermentasyon ortamıdır. Bu nedenle peynir altı suyu çeşitli mikrobiyal fermentasyon ile peynir altı suyundan elde edilebilecek başlıca ürünler ve bunların uygulanma alanları mevcuttur. Örneğin; peynir altı suyunun fermente edilmesi ile insan sağlığına faydalı sağlıklı bir içecek, endüstriyel kullanımda değerlendirilebilecek sirke üretimi, biyolojik atıklardan katma değerli materyallerin ham maddesi elde etmek mümkün hale gelmiştir. Mikrobiyal

fermentasyonda peynir altı suyunun içerisindeki laktoz, mikroorganizmalar tarafından kullanılarak yeni bir ürün açığa çıkartılmaktadır.

Peynir altı suyu; laktik asit bakterileri ile probiyotik içecek, maya ile enerji içeceği, asetik asit bakterileri ile sirke, biyopolimer üreten bakteriler ile biyoplastik, selüloz üreten bakteriler ile gıda ambalajı, koruyucu film olarak belirli alanlarda kullanılabilir (Zotta, Solieri, Iacumin, Picozzi & Gullo, 2020). Peynir altı suyu, yapısında bulunan laktoz, protein, mineraller sayesinde birçok mikroorganizma için büyüme substratıdır. Bu durum, peynirde mikrobiyal açıdan ürünün kalitesini belirlemektedir (Pintado, Macedo, & Malcata, 2001).

Mikrobiyal fermentasyon yönteminin nasıl gerçekleştiğine dair yapılmış bir çalışmada laktik asidin üretimi üzerine çalışılmıştır. Çalışmada peynir altı suyundan laktik asit üretimi için peynir altı suyu filtrelenerek serum proteinleri uzaklaştırılmış ve 110 °C'de 10 dakika sterilize edilmiştir. Sonrasında *Lactobacillus casei* kültürü inoküle edilerek, 37 °C'de 48 saat bekletilmiştir. pH değişiminin 6,5'ten 4,0'a düştüğü gözlemlenerek, laktik asit oluşturulmuştur (Büyükkileci, 2000).

Mikroorganizma etkinliğinde asitleşme, aroma oluşumu, sütte gerçekleşen ısıl işlemler, ısıl işlem süresi, pH değeri gibi durumlar kritik gelişmelerdir. Bu yüzden peynir altı suyu, atık bir ürün olarak değerlendirilmek yerine mikroorganizma sayesinde peynire dönüşen bir hammadde olarak değerlendirilmelidir (Pintado vd., 2001).

### 2.3.5. Mikrobiyal Enzim ve Rennet İnovasyonları

Peynirin lezzeti ve kalitesi sadece sütün bileşimine ve kullanılan rennet enzimine bağlı değildir. Aynı zamanda peynirdeki mikroorganizmalar (bakteri, küf vb.) tarafından üretilen enzimlerle de ilgilidir. Peynirdeki bakteri ve küfler; proteaz, peptidaz, lipaz gibi enzimleri üretmektedir. Belirtilen enzimler kazeini parçalamakta amino asit ve aroma maddeleri açığa çıkarmaktadır. Gerçekleşen bu mikrobiyal enzim faaliyeti sonucunda peynirde tat ve koku gelişmektedir (Afshari vd., 2020).

Mikrobiyal enzim ise; sütü pıhtılaştıran enzimin mikroorganizmalar tarafından karbon kaynağı, azot kaynağı, mineral tuz içeren besiyerinde fermentasyon yolu ile üretilmesidir (Hirpara, Kele & Patel, 2021).

Sütü pıhtılaştırıcı enzimlerden biri olan mikroorganizma kaynaklı (bakteri, küf, maya) proteaz enzimleri, mikroorganizmalar tarafından doğrudan sentezlenmektedir. Fermentasyon sonucu, ortamdan saflaştırılarak elde edilmektedir. Küf grubundan kullanılan en önemli küfler arasında *Rhizomucor miehei* gelmektedir (Wiśniewski, Małkowska-Kowalczyk, Łobacz, Zadernowska & Żulewska, 2025).

Ypılan bir çalışmada da hayvansal kökenli olan kimozen enzimi, süt ürününde doğal olarak bulunan bir maya türü olan *Kluyveromyces lactis* suşu'nun genomuna yerleştirilmiş, böylece maya türünün kendi proteinlerini üretir gibi kimozen üretmeye başlaması sağlanmıştır. Üretim sürecinde, genetik olarak



değiştirilmiş *Kluyveromyces lactis* hücrelerinden oluşan saf kültür, fermentasyon sistemine yetiştirilmiştir. Kimozin enzimi, fermentasyon ortamına salgılanmış, sonrasında filtrasyon yöntemi ile saflaştırılmıştır. Bu sayede mikroorganizma tarafından üretilen kimozin enziminin yapısı ve işlevi bakımından hayvandan elde edilen kimozin enzimi ile aynı olduğu gözlemlenmiştir. Bu açıdan FPC yönteminde kullanılan bitkisel enzimler de bitkisel süt pıhtılaştırıcıları kullanılarak elde edilen enzimlerdir. Yapılan bir çalışmada ise bitkisel enzimlerin yüksek proteolitik aktivite (PA) gösterdiği, bu yüzden üründe acı tat oluşturduğu için uzun sürede olgunlaşan sert yapıdaki peynirler için uygun olmadığı belirtilmektedir. Peynirdeki acı tat oluşumu genel olarak değerlendirildiğinde etki mekanizmasının enzimler (bitkisel ya da hayvansal) ile ilgili olduğu doğrudan bilinmektedir. (Nicosia, Puglisi, Pino, Caggia, & Randazzo, 2022).

Rennet inovasyonları kapsamında bir diğer önemli enzim çeşidi olan immobilize edilmiş pıhtılaştırıcı enzimler de sütün pıhtılaşmasında etkili proteaz enziminin çözünmeyen katı yüzeyine bağlanmış halidir. Enzim kullanılırken süte karıştırmak yerine nişasta, selüloz, alginat, pektat jel gibi bir yüzeye sabitlenmektedir. Yapılan çalışmada, pıhtılaştırıcı görev gören enzim doğrudan süte eklenmemiş, katı bir yüzeye sabitlenmiştir. Klasik peynir üretiminde tek kullanımlık olan enzim süte eklenmekte, pıhtı oluşarak peynir meydana gelmekte ve enzim kaybolmaktadır. Bu çalışmada ise enzim, nişasta-selüloz jel yüzeyine sabitlenmektedir. Süt belirtilen yüzeyden geçerek pıhtılaşmaktadır. Buradaki avantaj, kullanılan enzimin defalarca kullanılabilme imkanının yer almasıdır. “İmmobilize enzim” olarak adlandırılan bu enzim ile maliyetten kazanç, peynir kalitesini koruma gibi avantajlar mümkündür. Yalnız belirtilen bu avantajlı durumun yanında sütün yüzeyde erken pıhtılaşarak sistemin tıkanma, enzimin yüzeyden kopmama, uygun sıcaklık ayarlanamamasından kaynaklı kalite kayıplarının olabileceği de vurgulanmaktadır (Bihola vd., 2025).

Peynir üretiminde immobilize enzimin kullanıldığı bir diğer çalışmada da Rekombinant deve kimozini, *Bacillus circulans* proteaz, *Aspergillus niger* MC4 proteazı gibi rennetler seçilmiştir. Enzim; yumurta zarı membranı, Kitosan polimeri, Paraffin wax, Beeswax, Alginate-pectate jel, Oksidize karbon kumaş gibi taşıyıcı maddeye bağlanmıştır. Süt yapıya temas ettikçe, enzim taşıyıcı sistemde pıhtılaştırıcı etki görmüştür (Oštarić vd., 2022).

#### **2.4. Peynir Üretiminde Mikroenkapsülasyon Tekniğinin Kullanımı**

Mikroenkapsülasyon; vitamin, probiyotik, aroma gibi bileşenlerin küçük kapsüller içerisine alınarak, değerli bileşenlerin korunma işlemidir. Belirlenen bu bileşenler kullanılan kapsül sayesinde oksijen, ışık, nem gibi etkili faktörlerden korunmaktadır.

Mikroenkapsülasyon, özellikle peynir üretiminde vitaminler, probiyotik bakteriler, antioksidanlar gibi belirli bileşenlerin korunmasında, eklenen probiyotiklerin canlılığını sürekli hale getirmede ve besin değerini artırmada oldukça etkili bir görev almaktadır. Peynir üretiminde eklenen tuz, asit ve olgunlaşma sürecinde kullanılan probiyotikler etkinliğini kaybedebileceğinden

probiyotikler; alginat, pektin, sodyum kazeinat gibi maddelerle kapsüllenecek, peynir üretimine o şekilde dahil edilmektedir.

Mikroenkapsülasyon sayesinde peynir; folik asit, belirli vitaminler, demir, kalsiyum gibi maddelerle zenginleştirilerek peynirin besin değeri artırılmaktadır.

Peynirde en sık kullanılan kaplama materyalleri arasında;

- Sodyum kazeinat (süt proteini),
- Whey protein (peynir altı suyu proteini),
- Aljinat (deniz yosunu kaynaklı),
- Pektin,
- Lesitin materyalleri gelmektedir. Kullanılan materyaller, peynir substratı ile uyumlu ve doğaldır.

Bu yukarıda belirtilen kaplama materyallerinin yanısıra kullanılan enkapsülasyon tekniğinin seçimi de oldukça önemlidir. Peynir üretiminde en çok kullanılan mikroenkapsülasyon teknikleri Ekstrüzyon ve Emülsiyon Tekniğidir (El-Sayed, El-Sayed & Youssef, 2024).

Ekstrüzyon tekniği; probiyotik bakteri, enzim gibi yapıların hidrokoloid bir polimer çözeltisi içine damlatılarak jelleştirilmesi ve mikrokapsüller haline getirilmesidir. Ekstrüzyon Tekniği'nde, genel olarak probiyotikler kullanılmaktadır. Uygulanan Ekstrüzyon Tekniği'nde; jel oluşturuca (alginat vb.) bir çözelti hazırlanmaktadır. Kapsüllenecek bileşenler (mikroorganizma vb.) hazırlanan çözeltiye eklenerek, karıştırılmaktadır. Sonrasında karışım, kalsiyum içeren banyoya damla şeklinde verilerek, beklenen kapsüller elde edilmektedir. Böylece probiyotik içeren mikrokapsüllerin üretimi sağlanmış olmaktadır. Üretim ve depolama boyunca canlılık korunmakta ve ürünlerin tüketimi sonrasında bağırsakta salınmaları sağlanmaktadır. Emülsiyon tekniği ise; vitamin, yağ, aroma gibi bileşenlerin ilk olarak küçük damlacıklar haline getirilip bir sıvının içinde dağıtılması, daha sonra bu damlacıkların üstünün kaplanarak korunması yöntemidir (Venkatachalam, Susithraa, Abhinayasree & Mothil, 2025). Emülsiyon Tekniği'nde vitamin ve yağ asitleri kullanılmaktadır. Vitamin ve yağ maddeleri, taşıyıcı görevi görececek olan protein ve nişasta gibi bileşenler ile karıştırılarak emülsifiye edilmektedir. Burada vitamin ya da yağ asitleri kapsülün iç kısmını; protein ya da nişasta kapsülün duvar kısmını oluşturmaktadır. İlk aşamada yağ fazının hazırlanmasında vitamin, yağ fazı içerisinde çözülmemektedir. Su fazının hazırlanmasında su ve protein, nişasta gibi bileşenlerin karışımı sağlanmaktadır. Elde edilen yağ ve vitamin fazı, su ve protein vb. karışımının içerisinde eklenmektedir. Sonrasında yağ ve vitamin su içerisinde damlacık haline gelmektedir. Her damlacığın etrafında protein, nişasta gibi bileşenler bulunmaktadır. Buradaki kritik aşama emülsifikasyon (sıvı emülsiyon) olayıdır. Elde edilen sıvı emülsiyon, sprey kurutucuda kurutularak toz şeklinde mikro kapsüller elde edilmektedir. Elde edilen toz kapsüller, peynir üretiminde pıhtı kesiminden sonra peynir altı suyunun ayrılması ile geriye kalan peynir hamurunda kullanılabilir. Burada yapılan araştırmada sprey kurutucusu kullanılmadan da elde edilen enkapsülasyon sıvı emülsiyon yapısı

içerisinde veya jel boncuklar sayesinde kullanılabilir. Vitamin, mineral ve benzeri biyoaktif bileşenlerin, enkapsülasyon yöntemi ile süt ürünlerine eklenerek ürünlerin raf ömrünü, duysal kalitesini ve besinsel etkinliğini artırdığı tespit edilmiştir (El-Sayed vd., 2024).

Peynirde; laktik asit bakterileri (starter, probiyotik, yardımcı kültürler), enzimler, aroma ve uçucu bileşikler, antimikrobiyal maddeler (nisin, esansiyel yağlar vb.), mineraller ( $\text{Ca}^{2+}$  vb.) mikroenkapsüle edilebilmektedir (Oštarić vd., 2022).

Yapılan bir çalışmada keçi sütünden peynir üretiminde *Lactobacillus paracasei* ve *Bifidobacterium longum* bakterileri mikroenkapsüle edilerek kullanılmıştır. Koruyucu kaplama materyali olarak %1 sodyum aljinat kullanılmış ve ekstrüzyon yöntemi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada peynir üretim öncesinde enkapsülasyon işlemi için probiyotik bakteriler ve %1 sodyum aljinat karıştırılarak  $\text{CaCl}_2$  çözeltisine damlatılmış ve aljinat boncukların oluştuğu gözlemlenmiştir. Böylece mikroenkapsüller fermentasyon işlemi öncesinde süte eklenmiştir. Yani yapılan işlem sırasıyla;

- Süt pastörize edilerek, 35–37 °C’ye soğutulmuştur,
- Mikroenkapsüller süte eklenmiştir,
- Starter kültür eklenmiştir,
- Maya eklenmiştir,
- Pıhtı oluşumu gözlemlenmiştir,
- Kesme, baskılama, salamura, olgunlaşma işleminden sonra sütte dağılmış halde bulunan kapsüller, pıhtı oluştuğu zaman peynir iç yüzeyine yerleşmiştir. Bu sayede mikroenkapsülasyon tekniğinde probiyotik bakterilerin canlılığının korunmuş olduğu belirlenmiştir (Kavas vd., 2021).

Peynir üretiminde mikroenkapsülasyon tekniği genellikle, peynirdeki probiyotiklerin korunması için uygulanmaktadır. Çünkü üretilen peynir, depolama esnasında; ısı, asitlik gelişimi, soğukta depolama gibi çevresel faktörlerden etkilenebilmektedir. Yapılan bir çalışmada Cottage peynir üretiminde doğal bir polisakkarit olan sodyum aljinat ile prebiyotik etki gösteren aloe vera jeli ile karışım oluşturulmuştur. Ekstrüzyon tekniği ile bu karışımdan küçük aljinat boncuklar elde edilmiştir. Elde edilen aljinat boncuklar, 1 saat süre ile  $\text{CaCl}_2$ ’nin içerisinde bekletilerek sertleştirilmiştir. Sonrasında çok katmanlı bir yapıya sahip olan kitosan çözeltisinde boncuklar bekletilerek, aljinat boncuğunun ikinci bir katman ile kaplanması sağlanmıştır. Son işlem olarak elde edilen bu kapsüller sudan geçirilerek 4 °C ‘deki ortam sıcaklığında muhafaza edilmiştir. Bunun sonucunda aloe veralı (sinbiyotik) kapsüller sayesinde peynirdeki probiyotik canlılık korunmuş, antioksidan aktivite artmıştır (Ahmed, Muhammad & Zaidi, 2021).

## 2.5. Peynir Üretiminde İnovatif Teknikler

Günümüzdeki peynir üretim şekli ne kadar otomasyon şeklinde ve kontrollü olsa da peynir üretim alanında özellikle kalite, verim, süre ve çevresel etki

bakımından birtakım inovatif gelişmelere hala ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlar aşağıdaki başlıklar altında açıklanmıştır:

### **2.5.1. Süt Bileşiminde Daha Hassas Yapılan Kontroller**

Peynirin kalitesi, sütün protein, yağ gibi bileşenlerine ve pH değerine bağlıdır. Üretim aşamasında süte uygulanan pastörizasyon gibi ısıl işlemler, peynirdeki verimi artırırken pıhtılaşma durumunu zorlaştırabilmektedir. Bu yüzden sütteki bileşenlerin daha önceden ölçülerek, işlem parametrelerinin de bu ölçüme göre ayarlanabiliyor olması gerekmektedir. Protein, yağ ve bazı kimyasal bileşenler; spektroskopik yöntemlerden özellikle Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR), Yakın Kızılötesi Spektroskopisi (NIR), Raman ve NMR (Nükleer Manyetik Rezonans Spektroskopisi) ile ölçülebilmektedir.

### **2.5.2. Pıhtının Kesileceği Zamanın Sensörlerle Belirlenmesi**

Geleneksel yöntemle yapılan pıhtı kesme aşaması peyniri yapan kişi tarafından belirlenmekte, bu durum da çoğu zaman peynirde protein kaybının yaşanmasına, yağ oranının azalmasına, peynir yapısında birtakım bozukluklara neden olabilmektedir. Bu yüzden pıhtının kesme zamanını belirlemek için jel sertliğini ölçen optik sensörler, pıhtı kesme işleminden sonra tane boyutunu izlemek için görüntü tabanlı sensör sistemleri, pıhtılaşma süresini tahmin etmek için ise; ultrasonik sensörlerin kullanılması gerekmektedir.

### **2.5.3. Ultrafiltrasyona Dayalı Peynir Üretimi**

Geleneksel peynir üretiminde sırasıyla; süt pıhtılaşarak, peynir altı suyu ayrılmaktadır. Bu aşamada peynirdeki doku ve aroma durumu birlikte ilerlemektedir. Bu durumun sonucunda genel olarak peynirde olgunlaşma süreci de zaman almaktadır. Olgunlaşma süresinin uzun olması da üretimdeki su ve enerji tüketimini artırmaktadır. Bu yüzden ultrafiltrasyon yönteminin uygulanması gerektiği savunulmaktadır. Bu yöntemde peynir dokusunun oluşması aromanın gelişmesine bağlı değildir.

Ultrafiltrasyon aşamasında pıhtılaşma işleminden sonra peynir altı suyunun ayrılması için süzme işlemi yerine ultrafiltrasyon membranları kullanılmaktadır. Ultrafiltrasyon sayesinde; peynir altı suyunun büyük bir kısmı uzaklaştırılarak, peynir ve yağ oranı yoğunlaştırılabilir.

Peynirdeki aroma oluşumu için de aroma, peynirin iç yapısında değil, farklı bir ortamda üretilmektedir. Bunun için süt ya da süt türevi gibi bir ortam ayarlanmaktadır. Burada kontrollü fermentasyon için sıcaklık, pH, süre ve besin içeriği aroma üretimi için düzenlenmektedir. Yüksek proteolitik ve lipolitik kapasiteye sahip mikroorganizmalar seçilmekte ve kontrollü fermentasyon ortamında aroma bileşikleri oluşturulmaktadır. Oluşturulan aromalı fermentasyon ürünü, ultrafiltrasyon ile hazırlanmış peynire eklenmektedir. Böylece, aroma peynir dokusunun dışında üretildiği için sadece tat ve koku desteği sağlanarak peynirin dokusu bozulmamakta ve peynirin olgunlaşma süresi kısalmaktadır (Croguennec vd., 2025).

#### 2.5.4. Yüksek Basınç

Yüksek basınç (HPP), ısıtma işlemi kullanılmadan gıdanın güvenliğini ve raf ömrünün uzatılmasının sağlandığı bir teknolojidir. Tekniğin yapım aşaması için ilk olarak sütün hazırlanması gerekmektedir. Bunun için ürün işleminden önce ambalajlanarak yüksek basınç dayanıklı bir çelik haznenin içerisine konulmaktadır. Basıncın ürüne su aracılığı ile iletilmesi için hazne tamamen su ile doldurulmalıdır. Sistem çalıştırılarak suya yüksek basınç (300–900 MPa) uygulanmaktadır. Basınç yaklaşık 5-10 dakika gibi bir sürede tutularak, mikroorganizma (patojen, küf vb.) hücre zarının bozulması sağlanmaktadır. Sütteki yararlı bakterilerin etkilenmemesi için HPP, genellikle çiğ sütte fermentasyon öncesinde uygulanmaktadır. Uygulanan 5-10 dakika gibi bir süre tamamlandığında uygulanan bu basınç kontrollü bir şekilde düşürülmektedir. Basıncın düşürülmesinden sonra hazne açılarak ürün çıkarılmaktadır. Bu durumda HPP, süt proteinlerinin yapısını değiştirerek, peynir yapımında daha hızlı pıhtı oluşumunu ve daha düzgün teleme yapısını sağlamaktadır (Agriopoulou, Severoğlu, Varzakas & Özer, 2023).

#### 2.5.5. Ultrasonik İşlem

Bu yöntem, süt içerisinde basınç dalgalanmaları, fiziksel titreşim ve mikro kabarcık patlamaları ile sütteki bileşenleri etkileyen bir yöntemdir. Sütte ultrason yönteminin önemi 3 başlık altında incelenmektedir;

- Isıtma işlemi olmadan uygulanması,
- Ürünün kalitesinin artırılması,
- Fonksiyonel süt ürünleri için kullanışlı olması.

Ultrason yöntemi, ısısız ya da düşük ısıda çalıştığı için ürünün besin değeri korunmaktadır. Daha iyi bir tekstür özellikte ve aroma olması ürünün kalitesini artırmaktadır. Üründeki probiyotik bakterilerin gelişimi desteklenebilmektedir.

Ultrasonik işlem için süt ultrasonik bir reaktöre alınarak, titreşimlerin iletebileceği bir ortam sağlanmaktadır. Süte 20–100 kHz frekansta ses dalgaları gönderilmektedir. Ultrason ses dalgaları, sütte mikro kabarcıkların oluşmasını ve patlamasını sağlamaktadır. Buradaki patlama olayında yağ ve protein yapıları parçalanarak, yeniden düzenlenmektedir. Ürünün işlenebilirliği artmaktadır. Kıvam ve akış özellikleri kontrol edilebilmektedir. Fakat, bazı kimyasal bağlar etkilenecek yağ oksidasyonu gözlemlenebilmektedir. Bu yüzden yöntemin dikkatli uygulanması gerekmektedir. Ultrasonik işlem süte uygulandığında, süt daha iyi pıhtılaşmakta ve peynirin yapısını iyileştirmektedir. Bu yöntem, gıda güvenliği açısından peynir için önem taşımaktadır (Rathnakumar vd., 2024).

#### 2.5.6. Vurgulu Elektrik Alan (PEF)

Vurgulu elektrik alan (PEF), sıvı gıdalardaki mikroorganizmaları inaktive etmek ve enzim aktivitesini kontrol etmek için uygulanan bir yöntemdir. PEF, peynir üretim öncesinde sütün hazırlık aşamasında uygulanmaktadır. Sistemin çalışma prensibi incelendiğinde; süt, paslanmaz çelikten yapılmış iki elektrot arasına yerleştirilerek süte 1-5 mikrosaniye gibi kısa süreli yüksek voltajlı (15-50

kV/cm şiddetinde) elektrik darbeleri uygulanmaktadır. Böylece ürünün ısıtılmadan önce hücre yapısının etkilenmesi sağlanmaktadır. PEF'in uygulanma aşamasında elektrik alanının ürünün hücre zarında porlar açarak mikroorganizmanın inaktive olması sağlanmaktadır.

PEF yönteminde peynir üretiminde kullanılan pıhtının daha sıkı olduğu ve bu durumun peynir randımanına olumlu etki yaptığı belirtilmektedir (Anlı & Kırıl, 2013).

### **2.5.7. Pıhtılaştırıcı Yeni Nesil Enzimler**

Buzağı şirdeninden elde edilen enzim yerine mikrobiyal ve rekombinant enzim kullanılmaktadır. Kullanılan bu enzimler sayesinde peynirin olgunlaşma hızı ayarlanabilmekte ve acı tat oluşumu azaltılabilmektedir.

### **2.5.8. Genomik Dizilime Göre Yapılan Omic Teknolojileri**

Kullanılan DNA dizilim tekniğine göre, peynirdeki tüm mikroorganizmalar, tanımlanarak, hangi bakterinin hangi aroma ve enzimi ürettiği belirlenebilmektedir. Böylece istenmeyen küf ve bakterilerin oluşumu önlenebilmektedir.

### **2.5.9. 2-in-1 Starter Kültürler**

Geleneksel olarak üretilen peynir üretiminde kullanılan starter kültürlerin çeşidi kullanılan amaca göre değişebilmektedir (örneğin; fermantasyon sürecinde kullanılan kültürler, koruyucu olarak kullanılan starter kültürler gibi).

2 in 1 starter ise peynirde hem fermantasyonu hem de koruyucu görevini üstlenebilmektedir. Bu kültürler, aynı anda fermantasyon yapabilmekte, fermantasyon aşamasında doğal antimikrobiyal madde üretebilmektedir. Bu sayede küf gelişimi kontrol altına alınarak üretimin güvenilirliği desteklenmiş olur.

### **2.5.10. Su ve Enerji Tüketiminin Azaltılması**

Peynir üretiminde su ve enerji tüketimi fazladır. Bu durum, üretim alanında kullanılan tank, membran gibi sistemlerin CIP (Yerinde temizlik) yani üretim alanındaki temizlik aşamaların sürekli yapılmasından ve peynir altı suyunun işlenmesi aşamasında harcanan enerji miktarından kaynaklanmaktadır.

Su ve enerji tüketiminin azaltılması için çalıştırılan geleneksel CIP sistemleri yerine enzim bazlı temizliğin yenilikçi bir çözüm olduğu savunulmaktadır. Çünkü enzim bazlı temizlikte; daha az düşük sıcaklık, daha az kimyasal ihtiyacı, daha az temizlik süresi durumlarından dolayı enerji tüketimi azaltılabilmektedir.

Peynir altı suyunun günümüzde artık bir atık değil, değerlendirilmesi gereken bir yan ürün olduğu belirtilmektedir. Bu sayede peynir altı suyu değerlendirilerek atık su arıtma ihtiyacı azaltılarak, çevresel sürdürülebilirlik azaltılabilmektedir. Bu duruma ek olarak, peynir altı suyunun yeni nesil kurutma teknolojisi olan ince film döner buharlaştırıcılar ile enerji maliyetinin de azaltılmasının önemi vurgulanmaktadır.

Ürün kalitesinin sürekliliğinin sağlanması ve çevresel etkinin azaltılması için hedeflenen bu tür inovatif yaklaşımlar, peynir endüstrisi açısından büyük önem taşımaktadır (Croguennec vd., 2025).

## 6. SONUÇ

Peynir üretiminde sürdürülebilirliği sağlayabilmek için çiğ süt üretimindeki çevresel etki dikkat çekmektedir. Bu yüzden sadece süt işleme fabrikasındaki proses işlemlerinin iyileştirilmeye çalışılmasının yanı sıra hayvansal üretim zincirinin de yapılandırılmasına dikkat edilmelidir.

Peynir üretiminde bir diğer önemli nokta ise, fermantasyon ve olgunlaştırma süreçleridir. Otolitik kültür, pH modülasyonu, mikroenkapsülasyon gibi uygulanan yöntemler, peynirin olgunlaşma süresini kısaltarak, üretim maliyetini ve harcanan enerjiyi azaltmaktadır.

Biyolojik ham madde olan peynir altı suyunun da atık olarak değil, katma değerli bir ürün olarak değerlendirilmesi de diğer bir önemli noktadır.

Alternatif süt kaynakları da peynir üretiminde uygulanabilecek potansiyele sahiptir. Yapay kazein misellerinin doğal miseller gibi davranması ileride hayvansız peynir üretimini etkin kılacaktır.

Bunun yanı sıra rekombinant ve bitkisel kökenli yeni nesil pıhtılaştırıcı enzimlerin kullanımı ile peynir üretiminde hayvansal kaynaklara olan bağımlılığın azaltılabileceği, proteolitik aktivitenin daha iyi kontrol edilebileceği ortaya konulmuştur.

Belirtilen inovatif fermantasyon ile teknolojik teknikler sayesinde uygulanan yeni nesil enzim uygulamaları, mikroenkapsülasyon teknolojileri ve yan ürünlerin değerlendirilmesine yönelik sürdürülebilir yaklaşımlar, su ve enerji tüketiminin, ürün veriminin artmasının ve atıkların ekonomik değere dönüştürülmesinin peynir üretiminde sürdürülebilirliğin sağlanması konusunda elde edilen önemli kazanımlardır.

## KAYNAKLAR

- Yavaş, Ş. N. A., & Karabekmez-Erdem, T. (2025). Peynir üretim süreçlerinde karbon ayak izi ve azaltım stratejileri üzerine bir çalışma. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(3), 1639-1649.
- Opiyo, A., Kidega, K., Okello-Uma, I., & Olum, S. (2024). Physico-chemical and microbiological quality of raw milk produced by smallholder farmers in Gulu City, Northern Uganda. *Cogent Food & Agriculture*, 10(1), 2303175.
- Rankin, S. A., Bradley, R. L., Miller, G., & Mildenhall, K. B. (2017). A century of dairy processing advancements—Pasteurization, cleaning and sanitation, and sanitary equipment design. *Journal of Dairy Science*, 100(12), 9903-9915.
- Dodurka, H. T., Özmen, H. F., & Çetin, Ö. (2023). Hayvansal gıdaların sürdürülebilirliği ve çevreye olan etkisi. *İstanbul Rumeli Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi*, 2(1), 82-94.
- Debnath, P. P., Roy, K., Debnath, A., & Sanyal, M. K. (2022). Life cycle assessment and application of green technologies in dairy industry to reduce carbon footprint. *Indian Journal of Animal Health*, 61(2), 19-32.
- Croguennec, T., Le Loir, Y., & Jeantet, R. (2025). Breakthrough innovations in industrial cheesemaking processes. *Current Opinion in Food Science*, 62, 101267.
- Gänzle, M. G., Monnin, L., Zheng, J., Zhang, L., Coton, M., Sicard, D., ... Walter, J. (2024). Starter culture development and innovation for novel fermented foods. *Annual Review of Food Science and Technology*, 15, 341-365.
- Şimşek, Ö., Gürsoy, O., Dalca, S. H., & Yılmaz, Y. (2016). Laktik asit bakterilerinde otoliz ve peynir teknolojisindeki önemi. *Akademik Gıda*, 14(3), 293-301.
- Afshari, R., Pillidge, C. J., Dias, D. A., Osborn, A. M., & Gill, H. (2020). Cheesomics: The future pathway to understanding cheese flavour and quality. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(1), 33-47.
- McDonagh, M., O'Donovan, S., Moran, A., & Ryan, L. (2024). An exploration of food sustainability practices in the food industry across Europe. *Sustainability*, 16(16), 7119.
- Bihola, A., Sharma, H., Chaudhary, M. B., Bumbadiya, M. R., Kumar, D., & Adil, S. (2025). Recent developments in cheese technologies. *Food Reviews International*, 41(3), 978-1012.
- Johnson, M. E. (2017). A 100-year review: Cheese production and quality. *Journal of Dairy Science*, 100(12), 9952-9965.
- Jones, B. J. (1999). *Cheese process control* (Unpublished master's thesis). University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.



- Hannon, J. A., Wilkinson, M. G., Delahunty, C. M., Wallace, J. M., Morrissey, P. A., & Beresford, T. P. (2003). Use of autolytic starter systems to accelerate the ripening of Cheddar cheese. *International Dairy Journal*, 13(4), 313-323.
- Zhao, S., Tadesse, B. T., Gu, L., & Solem, C. (2025). Cheese production revisited—Novel and overlooked strategies for improving efficiency and sustainability of cheese manufacturing. *Trends in Food Science & Technology*, 156, 105213.
- Bonaïti, C., Leclercq-Perlat, M. N., Latrille, E., & Corrieu, G. (2004). Deacidification by *Debaryomyces hansenii* of smear soft cheeses ripened under controlled conditions: Relative humidity and temperature influences. *Journal of Dairy Science*, 87(11), 3976-3988.
- Bockelmann, W., Hoppe-Seyler, T., Jaeger, B., & Heller, K. J. (2000). Small scale cheese ripening of bacterial smear cheeses. *Milchwissenschaft*, 55(11), 621-624.
- Oštarić, F., Antunac, N., Cubric-Curik, V., Curik, I., Jurić, S., Kazazić, S., ... Mikulec, N. (2022). Challenging sustainable and innovative technologies in cheese production: A review. *Processes*, 10(3), 529.
- Zotta, T., Solieri, L., Iacumin, L., Picozzi, C., & Gullo, M. (2020). Valorization of cheese whey using microbial fermentations. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(7), 2749-2764.
- Büyükkileci, A. O. (2000). *L (+) lactic acid production from whey by Lactobacillus casei NRRL B-441* (Unpublished master's thesis). Izmir Institute of Technology, Izmir, Turkey.
- Pintado, M., Macedo, A. C., & Malcata, F. X. (2001). Review: Technology, chemistry and microbiology of whey cheese. *Food Science and Technology International*, 7(2), 105-116.
- Hirpara, P., Kele, V., & Patel, D. (2021). Rennet and alternative: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 58(1), 1-9.
- Wiśniewski, P., Małkowska-Kowalczyk, M., Łobacz, A., Zadernowska, A., & Żulewska, J. (2025). Invited review: Milk-clotting enzymes of microbial origin and their role in cheesemaking—A review. *Journal of Dairy Science*, 108(4), 2580-2598.
- Nicosia, F. D., Puglisi, I., Pino, A., Caggia, C., & Randazzo, C. L. (2022). Plant milk-clotting enzymes for cheesemaking. *Foods*, 11(6), 871.
- El-Sayed, S. M., El-Sayed, H. S., & Youssef, A. M. (2024). Recent developments in encapsulation techniques for innovative and high-quality dairy products: Demands and challenges. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 31, 100406.

- Venkatachalam, C. D., Susithraa, R. D., Abhinayasree, N., & Mothil, S. (2025). Microencapsulation techniques: A comprehensive review. *Food and Feed Research*, 52(1), 15-28.
- Kavas, N., Kavas, G., Kinik, Ö., Ateş, M., Kaplan, M., & Şatir, G. (2021). Symbiotic microencapsulation to enhance *Bifidobacterium longum* and *Lactobacillus paracasei* survival in goat cheese. *Food Science and Technology*, 42, e55620.
- Ahmed, S., Muhammad, T., & Zaidi, A. (2021). Cottage cheese enriched with lactobacilli encapsulated in alginate–chitosan microparticles forestalls perishability and augments probiotic activity. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(6), e15473.
- Agriopoulou, S., Severoğlu, M., Varzakas, T., & Özer, H. B. (2023). Recent advances in high pressure processing of milk and milk products-a review. *Journal of Agricultural Sciences*, 29(1), 1-12.
- Rathnakumar, K., Jain, S., Awasti, N., Vashisht, P., Thorakkattu, P., Ramesh, B., & Pandiselvam, R. (2024). Ultrasonic processing: Effects on the physicochemical and microbiological aspects of dairy products. *Critical Reviews in Biotechnology*, 44(8), 1638-1652.
- Anlı, E. A., & Kırıl, A. G. (2013). Vurgulu elektrik alan uygulamasının süt teknolojisinde kullanımı. *Akademik Gıda*, 11(1), 64-68.





## *BÖLÜM 17*

# **Maden Yatakları Değerlendirmelerinde Demir Oksit İz Elementlerin Kullanıldığı Diskriminant Diagramları**

*Dudu Koru<sup>1</sup> & Çiğdem Şahin Demir<sup>2</sup>*

## **GİRİŞ**

Manyetit ve hematit, çok sayıda maden yatağı tipinde yaygın olarak bulunan demir oksit mineralleridir. Bu mineraller, iki değerlikli (divalent), üç değerlikli (trivalent) ve dört değerlikli (tetravalent) katyonların kristal yapıya girmesi sonucu manyetit, kromit, spinel serisi ve ülvöspinel mineralleri ile kısmi ya da tam katı çözelti oluştururlar.

Farklı maden yatağı tiplerinden elde edilen manyetit ve hematit örneklerinde gerçekleştirilmiş elektron mikroprob (Electron Microprobe Analysis, EMPA) analizleri ve bu analizlerden elde edilen majör ile iz element içerikleri karşılaştırılmıştır. İncelenen yatak tipleri şunlardır: Demir Oksit-Bakır-Altın (IOCG), Kiruna tipi apatit-manyetit yatakları, Bantlı Demir Formasyonları (BIF), Porfiri Bakır yatakları, Fe-Cu skarn yatakları Fe-Ti, Vanadyum, Krom, Ni-Cu-PGE yatakları, Cu-Zn-Pb Volkanojen Masif Sülfid (VMS) yatakları, Arkeen yaşlı Au-Cu porfiri yatakları, Opemiska tipi Cu damarları (Dupuis ve Beaudoin, 2011)

Yapılan karşılaştırmalarda, farklı maden yatağı tiplerine ait manyetit ve hematitlerin iz element içeriklerinin sistematik olarak birbirinden farklı olduğu tespit edilmiştir. Bu farklılıklar kullanılarak değişik cevherleşme tiplerini birbirinden ayırabilen ayırt edici (discriminant) diyagramlar geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre manyetit ve hematitin iz element jeokimyasının maden yataklarının kökeninin belirlenmesinde güvenilir bir jeokimyasal araç olduğu ortaya konulmuştur (Dupuis ve Beaudoin, 2011).

Manyetit ve hematit, magmatik, sedimanter ve metamorfik kayalarda yaygın olarak bulunan iki temel oksit mineralidir (Ramdohr, 1980; Scheka ve diğ., 1980). Bu mineraller yalnızca kayaç oluşturan mineraller olarak değil, aynı zamanda çok çeşitli maden yatağı tiplerinde başlıca cevher minerali veya eser (aksesuar) mineral olarak da bulunurlar.

Manyetit, çok sayıda magmatik kayaçta yaygın bir aksesuar mineral olarak gelişmektedir. Bununla birlikte, bazı jeolojik ortamlarda magmatik ayrışma

<sup>1</sup> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 0009-0009-2423-629X

<sup>2</sup> Dr. Öğr. Üyesi Çiğdem ŞAHİN DEMİR, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi STBMYO, 0000-0002-0630-4924

veya kristal çökmesi sonucunda yerel olarak zenginleşerek manyetit bantları veya masif manyetit birikimleri oluşturabilir (Deer ve diğ., 1992).

Metamorfizma süreçleri ise genellikle düşük titanyum içerikli ve kimyasal olarak oldukça homojen manyetit oluşumuna neden olmaktadır (Hall ve Fischer, 1977; Johnson, 1979). Buna karşılık, metamorfizmaya uğramış volkanojen masif sülfid (VMS) yataklarında gelişen metasomatik reaksiyonlar sonucunda, yan kayaçlarla denge halinde bulunan gahnit ( $ZnAl_2O_4$ ) minerali oluşabilmektedir (Heimann ve diğ., 2005).

Demir oksit mineralleri yalnızca sedimanter demir oluşumlarında cevher minerali olarak bulunmaz; aynı zamanda Demir Oksit-Bakır-Altın (IOCG) yataklarında, Kiruna tipi apatit-manyetit yataklarında, Fe-Ti oksit yataklarında, çeşitli porfiri sistemleri ve skarn yataklarında da yaygın olarak gözlenmektedir.

Buna ek olarak, birçok cevher yatağında daha düşük oranlarda bulunmalarına rağmen önemli jeokimyasal bilgi sağlayan aksesuar mineraller olarak da yer alırlar. Bunlar arasında;

- Ni-Cu-PGE magmatik sülfid yatakları,
- Cu-Zn-Pb volkanojen masif sülfid (VMS) yatakları,
- Opemiska tipi bakır damarları,
- kırıntılı kayaçların hakim olduğu Pb-Zn yatakları bulunmaktadır (Leach ve diğ., 2010).

Manyetitin oluştuğu jeokimyasal ortam, mineralin kimyasal bileşimini doğrudan kontrol etmektedir (Hutton, 1950; Buddington ve Lindsley, 1964; Scheka ve diğ., 1980; Razjigaeva ve Naumova, 1992; Deer ve diğ., 1992). Başka bir ifadeyle, bir manyetit kristali oluştuğu magma, hidrotermal akışkan veya metamorfik ortamın kimyasal özelliklerini bünyesinde kayıt altına almaktadır.

Dolayısıyla, farklı maden yatağı ortamlarında gelişen fizikokimyasal koşulların değişkenliği, demir oksit minerallerinin iz element içeriklerinde de sistematik farklılıklar oluşturur. Bu nedenle manyetit ve hematitin kimyasal bileşimleri, bir maden yatağının kökenini belirlemek amacıyla "jeokimyasal parmak izi (geochemical fingerprint)" olarak kullanılabilir (Carew, 2004; Gosselin ve diğ., 2006; Singoyi ve diğ., 2006; Beaudoin ve diğ., 2007).

Detritik (kırıntılı) sedimanter kayaçlarda demir oksit mineralleri en yaygın ağır mineraller arasında yer almaktadır (Pettijohn ve diğ., 1987). Bu nedenle sedimanların kaynak kayaçlarının belirlenmesinde önemli göstergeler olarak kullanılmaktadırlar.

Demir oksitlerde ölçülen Ti, Mn, Cr, V, Ni, Co, Zr, Sn, Zn, Pb, Cu elementleri, sedimanların kaynak kayaçlarının belirlenmesinde güvenilir izleyiciler olarak kullanılmaktadır (Razjigaeva ve Naumova, 1992). Benzer şekilde Grigsby (1990), detritik manyetit tanelerinin olası kaynak kayaçlarını belirlemek için petrografik eksölüsyon dokuları ile kimyasal bileşim ölçütlerini birleştiren akış diyagramı şeklinde bir karar ağacı geliştirmiştir.

Apatit minerali, oluşum ortamına özgü kimyasal bileşim özellikleri gösteren bir başka mineraldir (Belousova ve diğ., 2002). Bu jeokimyasal özellikler, detritik sedimanların kaynak kökeninin belirlenmesine yönelik çalışmalarda başarıyla kullanılmıştır (Morton ve Yaxley, 2007).

Demir oksit minerallerinin jeokimyasal özelliklerinin, maden yataklarının kökenini ve tipini ayırt etmek amacıyla "jeokimyasal parmak izi" olarak kullanılması; petrojenez çalışmalarında spinel kimyasından yararlanılması (Barnes ve Roeder, 2001) ve elmas aramacılığında gösterge minerallerin kullanılması (Fipke ve diğ., 1995) ile benzerlik göstermektedir. Karasal spineller, farklı magmatik evrimleri ve metamorfik yeniden dengeye gelme süreçlerini yansıtan geniş bir kimyasal bileşim çeşitliliğine sahiptir. Ayrıca spinelin ana ve eser element bileşimleri, yüksekten düşüğe değişen basınç koşullarında gerçekleşen kristallenme süreçleri ile magmanın kabuksal malzeme ile etkileşimini ifade eden kabuksal kirlenme süreçlerinin jeokimyasal izlerini de korumaktadır (Barnes ve Roeder, 2001). Barnes ve Roeder (2001), yaklaşık 26.000 spinel analizinden elde edilen yoğunluk konturlu veri dağılım diyagramlarını kullanarak farklı mafik ve ultramafik kayalara özgü karakteristik spinel bileşim alanlarını ortaya koymuştur. Çinko bakımından zengin bir spinel türü olan gahnit, sülfürce zengin çinko içeren ve amfibolit ile granülit fasiyesinde metamorfizmaya uğramış kayalarda yaygın olarak bulunan bir aksesuar mineraldir (Spry ve Scott, 1986; Heimann ve diğ., 2005). Gahnitin bu karakteristik jeokimyasal özellikleri, metamorfizmaya uğramış VMS yatakları ile Broken Hill tipi Ag-Pb-Zn yataklarının aranmasında etkili bir gösterge mineral olarak kullanılmasına olanak sağlamaktadır (Spry ve Scott, 1986; Heimann ve diğ., 2005; Walters ve diğ., 2002). Bununla birlikte, çinkoca zengin spinelin kimyasal bileşimi yalnızca ana kayaların jeokimyasal özelliklerine değil, aynı zamanda metamorfik denge sıcaklığına da bağlı olarak değişmektedir (Heimann ve diğ., 2005).

Carew (2004), Avustralya'nın Cloncurry bölgesindeki IOCG yatakları, Na-Ca ve K-Fe alterasyon zonları, ekonomik olmayan demirtaşları (barren ironstones) ile yan kayalardan alınan manyetit, hematit, pirit ve kalkopirit örneklerinde çok sayıda eser elementi belirlemek amacıyla Lazer Ablasyon-İndüktif Eşleşmiş Plazma-Kütle Spektrometrisi (LA-ICP-MS) yöntemini kullanmıştır. Hematit analizlerinde Ti, Si, Mg, Al, Co, Ni, As, Sn, Sb, Zr, V, Mn, W, Sc, Ga ve Nb elementlerinin belirlenebilir düzeylerde bulunduğu; buna karşılık La, Mo, Ce, In, Hf, Bi, Pb, U ve Cu elementlerinin çoğunlukla tespit sınırına yakın veya bu sınırın altında kaldığı belirlenmiştir. Manyetit analizlerinde ise Ti, Si, Al, Mg, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Sn ve Pb elementlerinin genellikle tespit sınırının üzerinde olduğu, buna karşın As, Zr, Y, U, Hf, La, Ce, Bi, Sb, In, Mo, W ve Sn elementlerinin ise daha düşük derişimlerde bulunarak çoğunlukla tespit sınırına yakın veya altında kaldığı saptanmıştır.

Carew'e (2004) göre, İsveç ve Şili'deki Kiruna tipi yatakların eser element dağılım desenleri, Cloncurry bölgesindeki IOCG cevherleşmelerinden belirgin biçimde farklıdır. Ayrıca, Osborne yatağına ait manyetitlerin eser element bileşimlerinin, Ernest Henry IOCG yatağındaki manyetitlerden farklı olduğu da

ortaya konmuştur. Sonuç olarak Carew (2004), Cloncurry bölgesindeki IOCG yataklarına ait manyetitlerin, ekonomik olmayan demirtaşlarına kıyasla daha yüksek Sn ve Mn, buna karşılık daha düşük V, Ti, Mg, Si, Cr ve Zn içerikleri ile karakterize olduğunu göstermiştir. Aynı çalışmada hematitlerin ise daha yüksek As, Ga, Sb ve W derişimleri ile ayırt edildiğı belirtilmiştir.

Rusk ve diğ., (2009), Cloncurry bölgesinde cevherleşme içermeyen hidrotermal breşlerden alınan manyetit örneklerinin eser element bileşimlerini LA-ICP-MS tekniğı ile analiz etmiştir. Araştırmacılar, ekonomik cevherleşmeyle ilişkili olmayan breş manyetitlerinin, Ernest Henry IOCG yatağına ait cevher ilişkili manyetitle göre daha yüksek V ve daha düşük Mn içeriklerine sahip olduğunu belirlemiştir. Bu farklılığın, manyetitin çökeli mi sırasında hüküm süren mineral denge koşullarının bir sonucu olduğu değerlendirilmiştir.

Singoyi ve ark. (2006), Avustralya'daki seçilmiş VMS, skarn, IOCG ve Broken Hill tipi kırıntı kayaç egemen Pb-Zn yataklarından elde edilen manyetitlerin eser element bileşimlerini incelemiş ve verileri üç gruba ayırmıştır. LA-ICP-MS yöntemiyle yapılan analizlerde; A grubu elementler (Mg, Al, Ti, V, Mn, Co, Ni, Zn, Ga ve Sn) çoğunlukla tespit sınırının üzerinde belirlenmiş, aynı örnek içerisindeki farklı manyetit taneleri arasında tutarlı derişimler ve benzer element dağılım desenleri göstermiştir. B grubu elementler (Cr, As, Zr, Nb, Mo, nadir toprak elementleri (NTE), Ta, W ve Pb) ise daha düşük ve heterojen derişimlere sahip olup değışken dağılım desenleri sergilemiştir. Buna karşılık, C grubu elementler (Cu, Ag, Se, Tl, Te, Bi ve Au) çoğunlukla minimum tespit sınırının altında kalmıştır. Singoyi ve diğ., (2006), Sn/Ga ile Al/Co oranlarını kullanan diyagramın, incelenen maden yatağı tiplerinin birbirinden ayırt edilmesinde önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir.

Nadoll ve diğ., (2009) ise, ABD'nin batı Montana ve kuzey Idaho bölgelerinde yer alan Proterozoyik yaşlı Belt Süper grubu içerisindeki hidrotermal cevher yatakları ve bunların yan kayaçlarından alınan manyetit örneklerinin eser element bileşimlerini hem Elektron Prob Mikroanalizi (EMPA) hem de LA-ICP-MS yöntemleriyle incelemiştir. Yapılan faktör analizi, farklı jeolojik ortamlarda oluşmuş manyetit türleri arasında küçük ancak belirgin jeokimyasal farklılıklar bulunduğunu ortaya koymuştur. Buna göre; (1) hidrotermal Ag-Pb-Zn damarları ile metamorfizma sonrası magmatik sokulumlara ait manyetitler Mg ve Mn bakımından zenginleşirken, (2) gömülme metamorfizmasına uğramış kayaçlar, metamorfizma sonrası magmatik sokulumlar ve sedimanter kayaçlar içinde gelişmiş Cu-Ag yataklarına ait manyetitler ise V, Co ve Zn bakımından zenginleşmektedir. Nadoll ve diğ., (2009), gözlenen jeokimyasal farklılıkların yalnızca sınırlı düzeyde olmasını, cevherleşmelerin düşük sıcaklıklarda oluşması ve Belt tektonik grubunun metamorfik geçmişı sonucunda hidrotermal manyetitlerde katı hâl altı (sub-solidus) yeniden dengeye gelme süreçlerinin gerçekleşmesine bağlamıştır.



## Bazı Maden Yataklarında Demir Oksitlerin Kimyasal Bileşimi

Farklı maden yatağı tiplerinden elde edilen manyetit ve/veya hematitlerin ortalama kimyasal bileşimleri, her bir yataktaki tüm nokta analizlerinden elde edilen verilerin Lee ve Helsel (2007) tarafından tanımlanan K–M parametrik olmayan yöntemi kullanılarak hesaplanan ortalama değerleri esas alınarak değerlendirilmiştir. Her bir maden yatağı tipine ait demir oksit minerallerinin ortalama, minimum ve maksimum bileşimleri Tablo 1'de sunulmuştur. Aşağıda ayrıntılı olarak tartışıldığı üzere, aynı yatağa ait manyetit ve hematitlerin kimyasal bileşimleri arasında anlamlı farklılıklar gözlenmediğinden, bu minerallerin analizleri birlikte değerlendirilerek ortalama değerler hesaplanmıştır. Bununla birlikte, bazı yatak tiplerinde demir oksit minerallerinin kimyasal özelliklerini daha iyi ortaya koyabilmek amacıyla, tek tek tanelere veya bireysel analizlere ait ayrıntılı kimyasal bileşim verileri de kullanılmıştır.

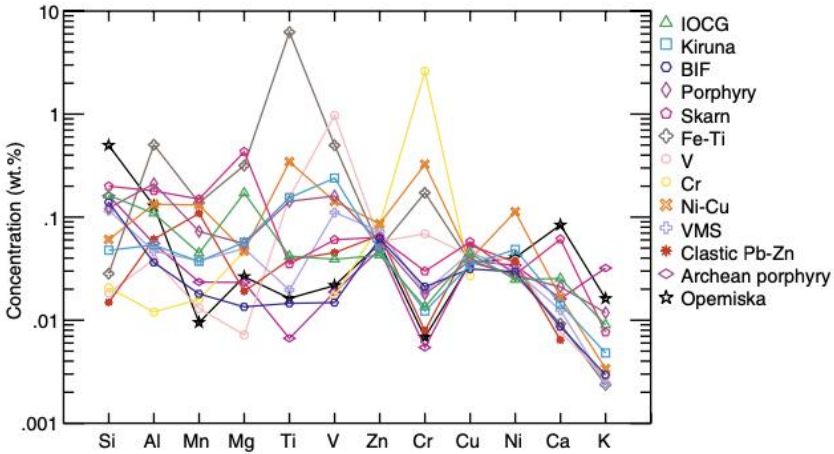
**Tablo 1.** Her bir cevher yatağı tipine ait demir oksit minerallerinin (manyetit ve hematit) ortalama, minimum ve maksimum bileşimleri (nd: tespit edilemedi) (Dupuis ve Beaudoin, 2011).

| Deposit Type            |      | Zn<br>wt. % | Cu<br>wt. % | Ni<br>wt. % | Mn<br>wt. % | Cr<br>wt. % | V<br>wt. % | K<br>wt. % | Ca<br>wt. % | Ti<br>wt. % | Al<br>wt. % | Si<br>wt. % | Mg<br>wt. % |
|-------------------------|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| IOCG (n=11)             | Mean | 0.043       | 0.044       | 0.025       | 0.045       | 0.013       | 0.039      | 0.009      | 0.025       | 0.042       | 0.109       | 0.163       | 0.171       |
|                         | Min  | 0.033       | 0.024       | 0.018       | 0.010       | 0.005       | 0.008      | 0.002      | 0.004       | 0.003       | 0.025       | 0.008       | 0.007       |
|                         | Max  | 0.054       | 0.093       | 0.031       | 0.128       | 0.077       | 0.116      | 0.028      | 0.119       | 0.131       | 0.247       | 0.555       | 1.175       |
| Kiruna-type (n=7)       | Mean | 0.047       | 0.034       | 0.048       | 0.037       | 0.012       | 0.238      | 0.005      | 0.014       | 0.154       | 0.053       | 0.047       | 0.057       |
|                         | Min  | 0.040       | 0.023       | 0.020       | 0.014       | 0.008       | 0.062      | 0.002      | 0.011       | 0.009       | 0.018       | 0.010       | 0.005       |
|                         | Max  | 0.065       | 0.064       | 0.116       | 0.101       | 0.018       | 0.479      | 0.010      | 0.022       | 0.431       | 0.100       | 0.119       | 0.191       |
| BIF (n=4)               | Mean | 0.061       | 0.031       | 0.029       | 0.018       | 0.021       | 0.015      | 0.003      | 0.009       | 0.014       | 0.036       | 0.138       | 0.013       |
|                         | Min  | 0.034       | 0.024       | 0.025       | 0.015       | 0.014       | 0.011      | 0.002      | 0.003       | 0.009       | 0.014       | 0.020       | 0.007       |
|                         | Max  | 0.084       | 0.047       | 0.039       | 0.022       | 0.041       | 0.022      | 0.005      | 0.015       | 0.022       | 0.056       | 0.296       | 0.018       |
| Porphyry (n=13)         | Mean | 0.057       | 0.038       | 0.027       | 0.072       | 0.018       | 0.160      | 0.012      | 0.021       | 0.142       | 0.211       | 0.122       | 0.055       |
|                         | Min  | 0.041       | 0.028       | 0.022       | 0.022       | 0.006       | 0.012      | 0.004      | 0.004       | 0.017       | 0.115       | 0.014       | 0.012       |
|                         | Max  | 0.109       | 0.067       | 0.051       | 0.295       | 0.092       | 0.619      | 0.048      | 0.089       | 0.358       | 0.431       | 0.343       | 0.179       |
| Skarn (n=15)            | Mean | 0.064       | 0.058       | 0.028       | 0.149       | 0.030       | 0.060      | 0.008      | 0.061       | 0.035       | 0.180       | 0.200       | 0.431       |
|                         | Min  | 0.042       | 0.034       | 0.021       | 0.010       | 0.004       | 0.008      | 0.003      | 0.004       | 0.003       | 0.025       | 0.009       | 0.005       |
|                         | Max  | 0.112       | 0.335       | 0.069       | 0.445       | 0.367       | 0.708      | 0.033      | 0.308       | 0.171       | 0.692       | 0.638       | 2.623       |
| Fe-Ti (n=5)             | Mean | 0.050       | 0.037       | 0.027       | 0.138       | 0.172       | 0.498      | 0.002      | 0.009       | 6.240       | 0.503       | 0.028       | 0.317       |
|                         | Min  | 0.043       | 0.026       | 0.023       | 0.018       | 0.010       | 0.052      | 0.002      | 0.002       | 0.797       | 0.026       | 0.014       | 0.011       |
|                         | Max  | 0.059       | 0.050       | 0.041       | 0.353       | 0.527       | 0.958      | 0.003      | 0.015       | 10.170      | 1.861       | 0.048       | 0.879       |
| V (n=1)                 |      | 0.058       | 0.042       | 0.038       | 0.013       | 0.069       | 0.968      | 0.003      | 0.008       | 0.156       | 0.039       | 0.018       | 0.007       |
| Cr (n=1)                |      | 0.085       | 0.027       | nd          | 0.016       | 2.608       | 0.017      | 0.003      | nd          | nd          | 0.012       | 0.021       | 0.047       |
| Ni-Cu (n=15)            | Mean | 0.086       | 0.039       | 0.113       | 0.132       | 0.325       | 0.142      | 0.003      | 0.017       | 0.345       | 0.133       | 0.061       | 0.047       |
|                         | Min  | 0.045       | 0.026       | 0.033       | 0.017       | 0.008       | 0.007      | 0.002      | 0.003       | 0.008       | 0.009       | 0.016       | 0.006       |
|                         | Max  | 0.282       | 0.079       | 0.318       | 0.384       | 1.711       | 0.408      | 0.010      | 0.135       | 1.851       | 0.610       | 0.226       | 0.142       |
| VMS (n=17)              | Mean | 0.073       | 0.045       | 0.030       | 0.037       | 0.019       | 0.110      | 0.002      | 0.012       | 0.019       | 0.047       | 0.115       | 0.049       |
|                         | Min  | 0.046       | 0.022       | 0.024       | 0.009       | 0.005       | 0.007      | 0.002      | 0.003       | 0.004       | 0.010       | 0.008       | 0.004       |
|                         | Max  | 0.196       | 0.091       | 0.057       | 0.161       | 0.224       | 1.372      | 0.005      | 0.055       | 0.145       | 0.265       | 0.688       | 0.232       |
| Clastic Pb-Zn (n=2)     | Mean | 0.067       | 0.053       | 0.037       | 0.109       | 0.008       | 0.045      | nd         | 0.006       | 0.039       | 0.061       | 0.015       | 0.019       |
|                         | Min  | 0.059       | 0.053       | 0.034       | 0.066       | 0.008       | 0.011      | nd         | 0.006       | 0.039       | 0.026       | 0.014       | 0.012       |
|                         | Max  | 0.075       | 0.053       | 0.039       | 0.151       | 0.008       | 0.080      | nd         | 0.006       | 0.039       | 0.097       | 0.016       | 0.026       |
| Archean porphyry (n=4)  | Mean | 0.049       | 0.038       | 0.034       | 0.023       | 0.005       | 0.019      | 0.032      | 0.016       | 0.007       | 0.056       | 0.161       | 0.023       |
|                         | Min  | 0.039       | 0.026       | 0.022       | 0.008       | 0.007       | 0.008      | 0.004      | 0.006       | 0.003       | 0.018       | 0.012       | 0.006       |
|                         | Max  | 0.064       | 0.040       | 0.057       | 0.066       | 0.026       | 0.030      | 0.102      | 0.045       | 0.012       | 0.170       | 0.458       | 0.054       |
| Opemiska Cu veins (n=8) | Mean | 0.055       | 0.036       | 0.040       | 0.009       | 0.007       | 0.022      | 0.016      | 0.084       | 0.016       | 0.129       | 0.497       | 0.026       |
|                         | Min  | 0.048       | 0.025       | 0.024       | 0.007       | 0.005       | 0.010      | 0.002      | 0.005       | 0.004       | 0.014       | 0.103       | 0.005       |
|                         | Max  | 0.076       | 0.077       | 0.081       | 0.018       | 0.011       | 0.033      | 0.039      | 0.208       | 0.025       | 0.285       | 0.851       | 0.113       |

## Örümcek Diyagramları

Örümcek diyagramları, belirli bir maden yatağı tipine ait demir oksit minerallerinin kimyasal bileşim özelliklerine genel bir bakış sunmaktadır. Şekil 1'de her bir maden yatağı tipi için seçilen 12 elementin ortalama bileşimleri gösterilmektedir. Her maden yatağı tipinin ortalama bileşimi, analiz sayısı fazla olan yatakların sonuçları aşırı temsil etmesini önlemek amacıyla, her bir yatağa ait manyetit ve hematit analizlerinin ortalama bileşimlerinden hesaplanmıştır.

Örümcek diyagramında seçilen 12 element, ortalama bolluklarına göre en yüksek derişime sahip Si elementinden en düşük derişime sahip K elementine doğru sıralanmıştır. Böylece hafif negatif eğimli ve daha düzgün desenler elde edilmesi amaçlanmıştır. Verilerin kıtasal kabuk, manto veya çalışmada oluşturulan demir oksit veri tabanının ortalama bileşim değerlerine göre normalize edilmesi, basit derişim grafiklerine kıyasla herhangi bir ek avantaj sağlamamıştır.



**Şekil 1.** Kaplan–Meier yöntemi kullanılarak hesaplanan, farklı cevher yatağı tiplerine ait demir oksit minerallerinin 12 element bakımından ortalama jeokimyasal bileşimlerini gösteren örümcek diyagramı (Dupuis ve Beaudoin, 2011).

Maden yatağı tiplerinin ortalama bileşimlerini gösteren örümcek diyagramı (Şekil 1), Ni-Cu yataklarının yüksek Ni ve Cr içerikleriyle karakterize edildiğini, buna karşılık skarnlar ile Opemiska tipi Cu damarlarının ise Ca bakımından görece zengin olduğunu göstermektedir. Düşük Ti içerikli manyetitler genellikle IOCG yataklarının karakteristik bir özelliği olarak kabul edilmekle birlikte, bu çalışmanın verileri bu özelliğin yalnızca IOCG yataklarına özgü olmadığını ortaya koymaktadır. Benzer şekilde skarn, kırıntı kayaç egemen Pb-Zn, VMS, Opemiska tipi Cu damarları ve BIF yatakları da düşük Ti içerikleriyle karakterize olup, hatta ortalama Ti derişimleri IOCG yataklarından daha düşüktür. Buna karşılık Kiruna tipi apatit-manyetit ve porfiri Cu yatakları, IOCG yataklarına göre daha yüksek Ti ve V derişimlerine sahiptir. Ayrıca Kiruna tipi apatit-manyetit yatakları, görece düşük Mn ve Al içerikleri ile de ayırt edilmektedir. Fe-Ti, V ve

Cr yataklarına ait demir oksitler ise sırasıyla Ti, V ve Cr elementlerince belirgin zenginleşmeleri sayesinde kolaylıkla tanınabilmektedir.

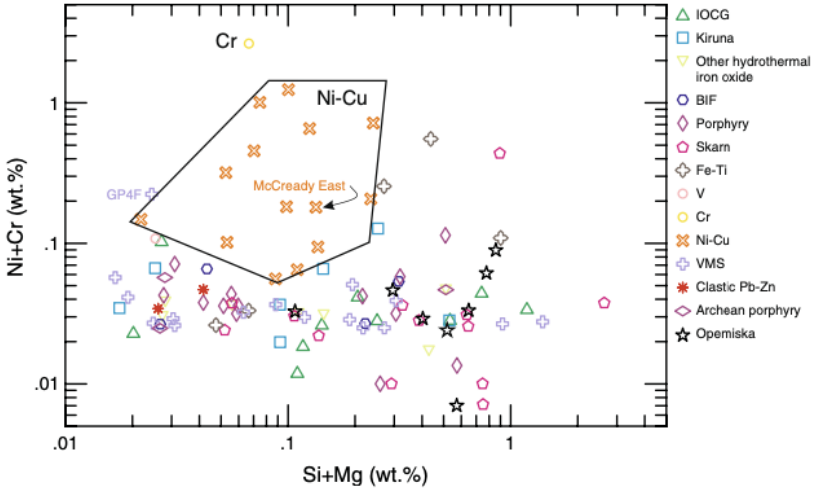
### **Ayırt Edici (Discriminant) Diyagramlar**

Son otuz yılda, petrojenez çalışmalarında kullanılan ayırt edici (discriminant) diyagramlar önemli ölçüde gelişmiş; başlangıçta sınırlı sayıda olan bu diyagramlar, günümüzde farklı kayaç türlerine uygulanabilen veya belirli kayaç tipleri ile jeolojik süreçlere özgü olarak geliştirilen çok sayıda sınıflandırma şemasına dönüşmüştür. Mineral kimyasına dayalı ayırt edici diyagramlar, özellikle kimberlit sokulumlarında bulunan ksenokrist minerallerin petrojenez özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmakta ve elmas aramacılığında yaygın bir araştırma yöntemi olarak kabul edilmektedir (Fipke ve diğ., 1995). Bu çalışmada da aynı yaklaşım benimsenmiş; farklı maden yatağı tiplerini ampirik olarak birbirinden ayırabilecek elementler, element oranları ve element kombinasyonları belirlenerek ikili diyagramlar geliştirilmiştir. Bu diyagramların bir kısmı tek bir maden yatağı tipini diğer tüm yatak tiplerinden ayırt edebilirken, diğerleri ise her biri farklı bir maden yatağı tipini temsil eden birden fazla ayırt edici alanın tanımlanmasına olanak sağlamaktadır. Çalışmanın devamında, maden yatağı tiplerinin en etkin şekilde sınıflandırılmasını sağlayan dört ayırt edici diyagram sırasıyla sunulmaktadır.

#### **Ni + Cr – Si + Mg Diyagramı**

Ni + Cr ile Si + Mg diyagramı (Şekil 2), Ni-Cu yataklarına ait ortalama manyetit bileşimlerini, diğer tüm maden yatağı tiplerine ait ortalama manyetit ve/veya hematit bileşimlerinden etkili bir şekilde ayırt edebilmektedir. Podiform kromit yataklarından elde edilen Cr-manyetit, yüksek Ni + Cr değerleri nedeniyle Ni-Cu-PGE yatakları için tanımlanan alanın üzerinde konumlanmaktadır. Ni-Cu yataklarını temsil eden ayırt edici alanın düşük Si + Mg sınırı, Finlayson Lake (Yukon, Kanada) bölgesinde yer alan ve amfibolit fasiyesi metamorfizmasına uğramış bir VMS yatağına ait GP4F örneğindeki manyetit bileşimi temel alınarak şimdilik (geçici olarak) tanımlanmıştır (Layton-Matthews ve ark., 2008).

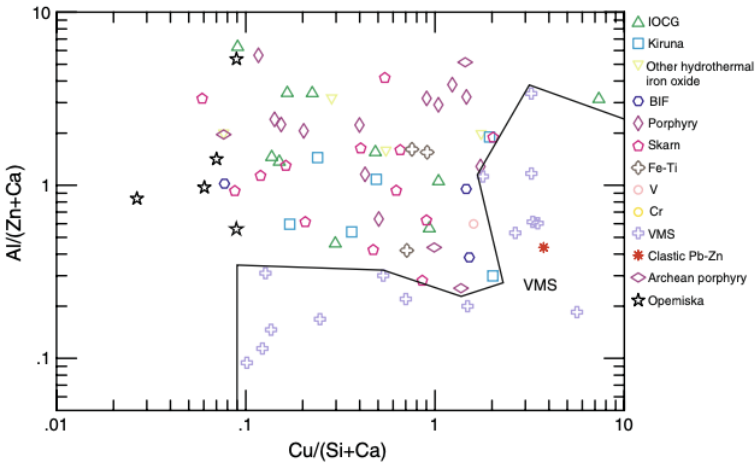
GP4F yatağında incelenen manyetitler çatlaklı bir yapı sergilemekte olup, bu durum söz konusu manyetitlerin deformasyondan önce oluşmuş olabileceğini düşündürmektedir. Manyetit, sülfür merccekleri içerisinde klorit ve hornblend matriksi içinde bulunmaktadır. Bununla birlikte, incelenen manyetitlerin metamorfizmaya uğramış yan kayaçlara mı yoksa metamorfizmaya uğramış masif sülfür cevherine mi ait olduğu kesin olarak belirlenememiştir. Buna karşılık, yakın konumda bulunan ve jeolojik özellikleri bakımından benzerlik gösteren Kudz Ze Kayah VMS yatağındaki pirit kapanımlı manyetitler (Layton-Matthews ve diğ., 2008), Şekil 2'de Ni-Cu yatakları için tanımlanan alanın altında yer almaktadır.



**Şekil 2.** Ni-Cu yataklarına ait ortalama demir oksit bileşimlerinin diğer cevher yatağı tiplerinden ayırt edilmesini gösteren Ni + Cr – Si + Mg ayırt edici diyagramı (Dupuis ve Beaudoin, 2011).

#### Al/(Zn + Ca) – Cu/(Si + Ca) Diyagramı

Al/(Zn + Ca) ile Cu/(Si + Ca) diyagramı (Şekil 3), daha önce Ni + Cr ile Si + Mg diyagramı (Şekil 2) kullanılarak ayırt edilmiş olan Ni-Cu yatakları dışında, VMS yataklarını diğer tüm maden yatağı tiplerinden etkili bir şekilde ayırmaktadır. VMS yataklarına ait manyetitler genellikle yüksek Si, Zn ve Ca; buna karşılık düşük Al içerikleri ile karakterize edilmektedir (Şekil 1). VMS yatakları için tanımlanan ayırt edici alan oldukça geniş olmakla birlikte, Kanada'nın Yukon bölgesindeki Faro Vangorda kırıntı kayaç egemen Pb-Zn yatağına ait örnekler dışında diğer maden yatağı tiplerine ait demir oksit minerallerini kapsamamaktadır. Franklin ve diğ., (2005) tarafından önerilen litostratigrafik sınıflandırmaya göre alt gruplara ayrılmış daha fazla VMS yatağından elde edilecek manyetit ve hematit analizlerinin, VMS ve kırıntı kayaç egemen Pb-Zn yatakları için daha hassas ayırt edici alanların ve/veya yeni ayırt edici diyagramların geliştirilmesine katkı sağlayacağı belirtilmektedir. Bu konu hâlen araştırılmaya devam etmektedir.



**Şekil 3.** VMS yataklarından elde edilen manyetitlerin diğer maden yatağı tiplerinden ayırt edilmesini sağlayan  $Al/(Zn + Ca) - Cu/(Si + Ca)$  ayırt edici diyagramı (Dupuis ve Beaudoin, 2011).

### Ti + V Temelli Ayırt Edici Diyagramlar

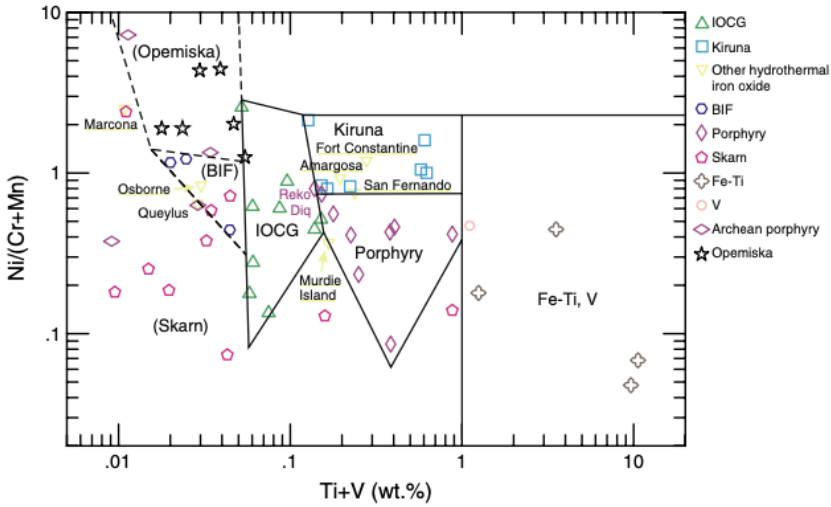
Daha önce de gösterildiği gibi, demir oksit minerallerindeki Ti ve V derişimleri maden yatağı tipine bağlı olarak belirgin değışimler göstermektedir (Şekil 1; Tablo 1). Bu nedenle Ti + V toplamı,  $Ni/(Cr + Mn)$  oranı (Şekil 4) veya  $Ca + Al + Mn$  toplamı (Şekil 5) ile birlikte kullanıldığında, farklı maden yatağı tiplerinin ayırt edilmesinde yararlı bir parametre oluşturmaktadır. Ni-Cu ve VMS yatakları sırasıyla  $Ni + Cr - Si + Mg$  diyagramı (Şekil 2) ile  $Al/(Zn + Ca) - Cu/(Si + Ca)$  diyagramı (Şekil 3) kullanılarak güvenilir biçimde tanımlanabildiğinden, bu yatak tiplerine ait örnekler  $Ni/(Cr + Mn) - Ti + V$  ve  $Ca + Al + Mn - Ti + V$  diyagramlarında gösterilmemiştir. Bunun nedeni, söz konusu iki diyagramın Ni-Cu ve VMS yataklarını diğer yatak tiplerinden ayırt etmede yeterli ayırt ediciliğe sahip olmamasıdır.

#### $Ni/(Cr + Mn) - Ti + V$ Diyagramı

$Ni/(Cr + Mn)$  ile  $Ti + V$  diyagramında (Şekil 4), IOCG, Kiruna tipi, porfiri Cu ile Fe-Ti ve V yataklarına ait ayırt edici alanlar belirgin bir şekilde tanımlanabilmektedir. Skarn yataklarına ait demir oksit mineralleri genel olarak düşük  $Ti + V$  derişimleri sergilemekle birlikte,  $Ni/(Cr + Mn)$  oranlarının geniş bir aralıkta değışmesi nedeniyle, bu diyagramda skarn yataklarına özgü belirgin bir bileşim alanı tanımlanamamaktadır.

Bantlı Demir Formasyonu (BIF) yataklarına ait demir oksit bileşimleri ise düşük  $Ti + V$  ve orta düzey  $Ni/(Cr + Mn)$  değerlerinde kümelenmekte; ancak bu bileşimler bazı skarn yataklarına ait demir oksitlerle kısmen çakışmaktadır (Şekil 4). Benzer şekilde, Opemiska tipi Cu damarlarına ait manyetitler de düşük  $Ti + V$  derişimleri ve yüksek  $Ni/(Cr + Mn)$  oranlarıyla karakterize edilmektedir. Bununla birlikte, bu bileşimler düşük  $Ti + V$  içeriklerine sahip Arkeen yaşlı porfiri yataklarına ait manyetitlerle örtüşmektedir. Arkeen porfiri yatakları da

düşük Ti + V derişimleri göstermelerine karşın, Ni/(Cr + Mn) oranları daha geniş bir değişim aralığı sergilemektedir.



**Şekil 4.** Kiruna tipi, IOCG, porfiri Cu, Fe-Ti-V ve BIF yataklarına ait ortalama demir oksit bileşimlerinin ayırt edilmesinde kullanılan Ni/(Cr + Mn) – Ti + V ayırt edici diyagramı (Dupuis ve Beaudoin, 2011).

#### Ni/(Cr + Mn) – Ti + V Diyagramı

Arkeen yaşı porfiri yataklarının düşük Ti + V değerleri, Fanerozoik porfiri Cu yataklarının daha yüksek Ti + V değerleriyle belirgin bir karşıtlık göstermektedir. Tablo 2'de "Diğer hidrotermal demir oksit" başlığı altında sınıflandırılan yatakların hiçbiri IOCG yatakları için tanımlanan alanda yer almamaktadır. Buna karşın, Fort Constantine, Amargosa ve San Fernando yatakları Kiruna tipi yataklara ait alanda konumlanmaktadır (Şekil 4).

Osborne yatağı genel olarak bir IOCG yatağı olarak kabul edilmektedir (Fisher ve Kendrick, 2008). Ancak bu yatakta Cu-Au cevherleşmesinin, daha önce oluşmuş manyetitçe zengin BIF cevherleşmesini üzerlediği bilinmektedir (Davidson ve Large, 1994; Williams, 1994). İlginç olarak, Osborne madenindeki Cu-Au cevherleşmesine ait manyetitler, Ni/(Cr + Mn) – Ti + V diyagramında BIF yatakları için tanımlanan alanda yer almaktadır (Şekil 4). Benzer şekilde Carew (2004) de Osborne yatağına ait manyetitlerin kimyasal bileşiminin Ernest Henry IOCG yatağındaki manyetitlerden farklı olduğunu göstermiştir.

Queylus yatağı da diyagramda Osborne yatağına yakın bir konumda bulunmaktadır (Şekil 4). Bununla birlikte, bu yatağın genetik sınıflandırması tartışmalıdır. Furic ve Jébrak (2005) Queylus'u IOCG tipi bir yatak olarak yorumlarken, Cimon (1973) tarafından daha önce Arkeen porfiri tipi bir yatak olarak değerlendirilmiştir. Diğer bir hidrotermal demir oksit yatağı olan Murdie Island ise porfiri ve IOCG yataklarına ait alanların kesişim bölgesine yakın bir

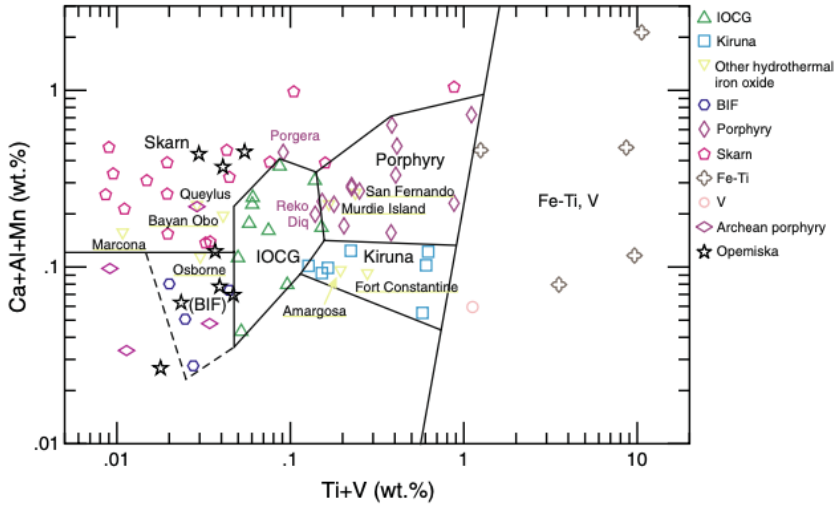
konumda yer almaktadır. Buna karşılık Marcona yatağı, Şekil 4’de skarn yatakları için tanımlanan alana yakın bir konumda bulunmaktadır.

#### Ca + Al + Mn – Ti + V Diyagramı

Ca + Al + Mn ile Ti + V diyagramı (Şekil 5), skarn, IOCG, Kiruna tipi, porfiri Cu ile Fe-Ti-V yataklarının birbirinden ayırt edilmesinde yararlı bir araçtır. Bu diyagramda, BIF yataklarına ait demir oksit mineralleri düşük Ti + V ve düşük Ca + Al + Mn değerlerinde kümelenmektedir. Bu özellik, bazı Opemiska tipi Cu damarı ve Arkeen yaşlı porfiri yataklarına ait demir oksit minerallerinde de gözlenmektedir. Bu nedenle, BIF yataklarına ait demir oksit minerallerinin skarn, Opemiska tipi Cu damarı ve Arkeen porfiri yataklarına ait demir oksitlerden ayırt edilebilmesi için hem Ni/(Cr + Mn) – Ti + V diyagramının (Şekil 4) hem de Ca + Al + Mn – Ti + V diyagramının (Şekil 5) birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Opemiska tipi Cu damarlarına ait manyetitler, hem skarn hem de BIF yatakları için tanımlanan alanlara yakın konumlanmaktadır. Bununla birlikte, bu yatak tipleri Ni/(Cr + Mn) – Ti + V diyagramı (Şekil 4) kullanılarak birbirinden ayırt edilebilmektedir. Bazı Arkeen yaşlı porfiri yataklarına ait manyetitler de Opemiska tipi Cu damarlarına ait manyetitlere yakın konumlarda yer almakta; ancak bu iki yatak tipini tamamen birbirinden ayıran özgün alanlar tanımlanamamaktadır.

Porgera yatağına ait veriler ise, örneklerdeki alışılmadık derecede düşük V içerikleri nedeniyle porfiri yatakları için tanımlanan alanın hafif solunda yer almaktadır (Şekil 5). Porgera yatağında manyetit içeren damarlar, ekonomik açıdan daha önemli olan II. evre kuvars–roskoelit–pirit–altın epitermal altın cevherleşmesinden farklı olarak, daha derin seviyelerde gelişmiş ve I. evreden önce oluşan manyetit–sülfür–kuvars–karbonat damarlarını temsil etmektedir. Bu damarlar, porfiri Cu tipi cevherleşmenin erken bir evresine ait olarak değerlendirilmektedir (Ronacher ve diğ., 2004). Porgera manyetitlerindeki olağan dışı düşük V içeriklerinin, bu yatakta geç evrede bol miktarda oluşan roskoelit mineraline vanadyumun bölünmesi (partitioning) ile ilişkili olabileceği düşünülmektedir.



**Şekil 5.** Kiruna tipi, IOCG, porfiri Cu, skarn, Fe-Ti-V ve BIF yataklarına ait ortalama demir oksit bileşimlerinin ayırt edilmesinde kullanılan  $Ca + Al + Mn - Ti + V$  ayırt edici diyagramı (Dupuis ve Beaudoin, 2011).

"Diğer hidrotermal demir oksit" grubunda yer alan yataklara ait demir oksit mineralleri genel olarak  $Ni/(Cr + Mn) - Ti + V$  diyagramında (Şekil 4) gözlenen alanlarda yer almaktadır. Bunun tek istisnası San Fernando yatağıdır. Bu yatak, Şekil 4'te olduğu gibi Kiruna tipi yataklar alanında değil, Şekil 6'da porfiri Cu yatakları için tanımlanan alanda konumlanmaktadır.

Bayan Obo Fe-NTE-Nb yatağına ait demir oksit minerallerinin  $Ni$  içerikleri,  $Ni/(Cr + Mn) - Ti + V$  diyagramında (Şekil 4) gösterilemeyecek kadar düşüktür. Buna karşılık bu örnekler, Şekil 5'te IOCG alanına oldukça yakın, skarn yatakları için tanımlanan alanda yer almaktadır. Bayan Obo yatağı, çok evreli bir cevherleşme sistemi olup, bazı araştırmacılar tarafından demir oksit yataklarının bir alt grubu olarak (Groves ve diğ., 2010), bazı araştırmacılar tarafından ise karbonatit yatakları sınıfı içerisinde değerlendirilmektedir (Smith, 2007).



## SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında değerlendirilen literatür, demir oksit minerallerinin eser element jeokimyasının farklı maden yatağı tiplerinin ayırt edilmesinde etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir. Özellikle manyetit ve hematitin eser element içerikleri, oluşum koşullarına bağlı olarak karakteristik jeokimyasal desenler sergilemekte ve cevherleşmenin kökeni hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır.

Kaplan–Meier yöntemi ile hesaplanan ortalama demir oksit bileşimleri kullanılarak oluşturulan örümcek diyagramları ve ayırt edici diyagramlar, farklı maden yatağı tiplerinin sistematik olarak sınıflandırılmasına olanak sağlamaktadır. Ni-Cu, VMS, IOCG, Kiruna tipi, porfiri Cu, Fe-Ti-V, skarn ve BIF yataklarının büyük bölümü, uygun element kombinasyonları kullanılarak birbirinden ayırt edilebilmektedir.

Bununla birlikte, bazı yatak tipleri arasında jeokimyasal benzerlikler bulunduğundan tek bir ayırt edici diyagramın tüm cevherleşmeleri güvenilir biçimde sınıflandırması mümkün değildir. Bu nedenle farklı element kombinasyonlarına dayanan ayırt edici diyagramların birlikte kullanılması ve elde edilen sonuçların petrografik, mineralojik ve jeolojik verilerle desteklenmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak, demir oksit minerallerinin eser element jeokimyası, cevherleşmenin oluşum ortamının belirlenmesi, farklı maden yatağı tiplerinin karşılaştırılması ve yeni arama modellerinin geliştirilmesi açısından önemli bir jeokimyasal araçtır. Günümüzde geliştirilen çok değişkenli ayırt edici diyagramlar, yalnızca akademik araştırmalarda değil, aynı zamanda mineral aramacılığı ve maden yataklarının değerlendirilmesinde de etkin olarak kullanılmaktadır.

## KAYNAKLAR

- Barnes SJ, Roeder PL (2001) The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks. *J Petrol* 42:2279–2302
- Beaudoin G, Dupuis C, Gosselin P, Jébrak M (2007) Mineral chemistry of iron oxides: application to mineral exploration. In: Andrew CJ (ed) Ninth Biennial SGA meeting. SGA, Dublin, pp 497–500
- Belousova EA, Griffin WL, O'Reilly SY, Fisher NI (2002) Apatite as an indicator mineral for mineral exploration: trace–element compositions and their relationship to host rock type. *J Geochem Explor* 76:45–69
- Buddington AF, Lindsley DH (1964) Iron–titanium oxide minerals and synthetic equivalents. *J Petrol* 5:310–357
- Carew MJ (2004) Controls on Cu–Au mineralisation and Fe oxide metasomatism in the Eastern Fold Belt, N.W. Queensland, Australia. Unpublished Ph.D. thesis, James Cook University
- Cimon J (1973) Possibility of an Archean porphyry copper in Quebec. *Can Min J* 94:97
- Davidson GJ, Large RR (1994) Gold metallogeny and the copper– gold association of the Australian Proterozoic. *Miner Deposita* 29:208–223
- Deer WA, Howie RA, Zussman J (1992) An introduction to rock- forming minerals, 2nd edn. Longman, Harlow, Wiley, New York
- Dupuis C, Beaudoin G, (2011) Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types. *Miner Deposita* 46:319–335
- Fipke CE, Gurney JJ, Moore RO (1995) Diamond exploration techniques emphasising indicator mineral geochemistry and Canadian examples. *GSC Bull* 423
- Fisher L, Kendrick M (2008) Metamorphic fluid origins in the Osborne Fe oxide–Cu–Au deposit, Australia: evidence from noble gases and halogens. *Miner Deposita* 43:483–497
- Franklin JM, Gibson HL, Jonasson IR, Galley AG (2005) Volcano- genic massive sulfide deposits. *Econ Geol* 100th Anniversary Vol:523–560.
- Furic R, Jébrak M (2005) Archean IOCG deposit in a fluidized dilational jog (Chibougamau, Abitibi, Canada). *Geol Soc Amer Abstr Program* 37:516
- Gosselin P, Beaudoin G, Jébrak M (2006) Application of the geochemical signature of iron oxides to mineral exploration. *GAC-MAC Annual Meeting Prog Abs* 31:CD-ROM
- Grigsby JD (1990) Detrital magnetite as a provenance indicator. *J Sed Petrol* 60:940–951

- Groves DI, Bierlein FP, Meinert LD, Hitzman MW (2010) Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits through earth history: implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits. *Econ Geol* 105:641–654
- Hall JM, Fischer JF (1977) Opaque mineralogy of basement rocks, Leg 37. *Init Rep Deep Sea Drill Proj* 37:857–873
- Heimann A, Spry PG, Teale GS (2005) Zincian spinel associated with metamorphosed Proterozoic base-metal sulfide occurrences, Colorado: a re-evaluation of gahnite composition as a guide in exploration. *Can Miner* 43:601–622
- Heimann A, Spry PG, Teale GS (2005) Zincian spinel associated with metamorphosed Proterozoic base-metal sulfide occurrences, Colorado: a re-evaluation of gahnite composition as a guide in exploration. *Can Miner* 43:601–622
- Hutton CO (1950) Studies of heavy detrital minerals. *GSA Bull* 61:635–713
- Johnson HP (1979) Opaque mineralogy of the igneous rock samples from DSDP hole 395A. *Init Rep Deep Sea Drill Proj* 45:407–420
- Layton-Matthews D, Peter JM, Scott SD, Leybourne M (2008) Distribution, mineralogy, and geochemistry of selenium in felsic volcanic-hosted massive sulfide deposits of the Finlayson Lake district, Yukon Territory, Canada. *Econ Geol* 103:61–88
- Leach DL, Bradley DC, Huston D, Pisarevsky SA, Taylor RD, Gardoll SJ (2010) Sediment-hosted lead–zinc deposits in Earth history. *Econ Geol* 105:593–625
- Lee L, Helsel D (2007) Statistical analysis of water-quality data containing multiple detection limits II: S-language software for nonparametric distribution modelling and hypothesis testing. *Comput Geosci* 33:696–704
- Morton A, Yaxley G (2007) Detrital apatite geochemistry and its application in provenance studies. In: Arribas J, Critelli S, Johnsson MJ (eds) *Geol Soc Amer Spec Paper* 420:319–344
- Mount Isa Eastern Succession, Australia: development and application of an exploration model for Broken Hill-type deposits. *Soc Econ Geol Spec Publ* 9:95–118
- Nadoll P, Mauk JL, Hayes TS, Koenig AE, Hofstra AH, Box SE (2009) Geochemistry of magnetite from hydrothermal ore deposits and their host rocks in the Proterozoic Belt Supergroup, USA. In: Williams et al. (eds) *Smart science for exploration and mining, Proc 10th Biennial Meeting, Townsville*, pp 129–131
- Pettijohn FJ, Potter PE, Siever R (1987) *Sand and sandstone* (2nd ed.), Springer, New York, pp 553

- Ramdohr P (1980) The ore minerals and their intergrowths. Pergamon, New York
- Razjigaeva NG, Naumova VV (1992) Trace element composition of detrital magnetite from coastal sediments of Northwestern Japan Sea for provenance study. *J Sed Petrol* 62:802–809
- Ronacher E, Richards JP, Reed MH, Bray CJ, Spooner ETC, Adams PD (2004) Characteristics and evolution of the hydrothermal fluid in the North zone high-grade area, Porgera gold deposit, Papua New Guinea. *Econ Geol* 99:843–867
- Rusk B, Oliver N, Brown A, Lilly R, Jungmann D (2009) Barren magnetite breccias in the Cloncurry region, Australia; comparisons to IOCG deposits. In: Williams et al. (eds) Smart science for exploration and mining, Proc 10th Biennial Meeting, Townsville, pp 656–658
- Scheka SA, Platkov AV, Vezhosek AA, Levashov GB, Oktyabrsky RA (1980) The trace element paragenesis of magnetite. Nauka, Moscow, p 147
- Singoyi B, Danyushevsky L, Davidson GJ, Large R, Zaw K (2006) Determination of trace elements in magnetites from hydrothermal deposits using the LA ICP-MS technique. SEG Keystone Conference, Denver, USA: CD-ROM
- Smith MP (2007) Metasomatic silicate chemistry at the Bayan Obo Fe-REE-Nb deposit, Inner Mongolia, China: contrasting chemistry and evolution of fenitising and mineralising fluids. *Lithos* 93:126–148
- Spry PG, Scott SD (1986) The stability of zincian spinels in sulfide systems and their potential as exploration guides for metamorphosed massive sulfide deposits. *Econ Geol* 81:1446–1463
- Walters SG, Skrzeczynski R, Whiting T, Bunting F, Arnold G (2002) Discovery and geology of the Cannington Ag-Pb-Zn deposit,
- Williams PJ (1994) Iron mobility during synmetamorphic alteration in the Selwyn Range area, NW Queensland: implications for the origin of ironstone-hosted Au-Cu deposits. *Miner Deposita* 29:250–260

