

MÜHENDİSLİK ALANINDA GÜNCEL METODOLOJİK YAKLAŞIMLAR

EDİTÖR
PROF. DR. ALPER BİDECİ

Mühendislik Alanında Güncel Metodolojik Yaklaşımlar

Editör

Prof. Dr. Alper Bideci

İmtiyaz Sahibi
Platanus Publishing®

Editör
Prof. Dr. Alper Bideci

Kapak & Mizanpaj & Sosyal Medya
Platanus Yayın Grubu

Birinci Basım
Mart, 2026

Yayımcı Sertifika No
45813

ISBN
978-625-8513-56-0

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

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

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



Platanus Publishing®

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1.....	5
Güvenin Dağıtılması: Türkiye Yükseköğretimi İçin %51 Konsorsiyum Uzlaşısına Dayalı Blokszincir Tabanlı Diploma Doğrulama Modeli Nurullah Öztürk & Mehmet Şakir Kurt	
BÖLÜM 2.....	23
Elektrik Makinelerinde Sargı Yalıtımına Etki Eden Stresler ve Arıza Süreçleri Emre Demirel	
BÖLÜM 3.....	37
Lucifer Şifrelemesinin İncelenmesi Fatma Elvan Sarıaydın & Ercan Buluş	
BÖLÜM 4.....	47
Performansa Dayalı Deprem Mühendisliği Perspektifinde Orta Hasarlı Betonarme ve Yığma Yapıların Analizi, Onarımı ve Sismik Güçlendirilmesi: Teorik Temeller, Uygulama Prosedürleri ve Karşılaştırmalı Değerlendirmeler Mehmet Şahin Duymuş	
BÖLÜM 5.....	71
Işkın Otu Özütünde Toplam Fenolik Madde Analiz Tuğba Başaran& Tijen Ennil Bektaş & Sezer Yiğit.....	
BÖLÜM 6.....	81
Türkiye’de Tıbbi Jeoloji Açısından Dikkat Çeken Çevresel Faktörler Serdar Baler	
BÖLÜM 7.....	95
Yüzey Sularında Mikrokirleticilerin Kaynakları, Çevresel Davranışı ve Olası Etkileri Simge Varol & Mehmet Ulusoy	
BÖLÜM 8.....	145
Bisfenol A'nın <i>Phanerochaete Chrysosporium</i> Kullanılarak Biyoremediasyonu Nuran Cıkcıkoğlu Yıldırım & Gokhan Onder Erguven & Mehtap Tanyol & Büşra Korkut	

BÖLÜM 9 175

**Elektrik Özdirenç Tomografi Yönteminde pyGIMLi Kütüphanesi ve Bert
Yazılımının Kullanımı**

Ziya Öncü

BÖLÜM 10 187

Jeofizik Mühendisliğinde Yapay Zekâ Araçlarının Kullanımı

Ziya Öncü



BÖLÜM 1

Güvenin Dağıtılması: Türkiye Yükseköğretimi İçin %51 Konsorsiyum Uzlaşısına Dayalı Blokzincir Tabanlı Diploma Doğrulama Modeli

Nurullah Öztürk¹ & Mehmet Şakir Kurt²

Giriş

Eğitim belgelerinin doğrulanması, küresel ölçekte milyonlarca bireyi, kurumu ve kamu otoritesini etkileyen kritik bir süreçtir. Yükseköğretim diplomaları yalnızca bireysel akademik kazanımların değil, aynı zamanda mesleki yetkinliğin, kamusal sorumluluğun ve kurumsal güvenin de bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir. Türkiye’de diploma doğrulama süreçleri çoğu zaman kurumsal yazışma, fiziksel evrak ibrazı, dijital imza ve kaşe kontrolü ile farklı kurum sistemleri arasında manuel koordinasyon gerektirmektedir. Bu durum işverenler açısından zaman kaybı, üniversiteler açısından operasyonel yüke ve mezunlar açısından tekrar eden belge sunma zorunluluğu anlamına gelmektedir. Özellikle kamu güvenliği açısından kritik mesleklerde, yanlış veya sahte belgelerle gerçekleştirilen istihdamlar toplum sağlığı ve kamu düzeni üzerinde dolaylı ancak ciddi riskler doğurabilmektedir.

Diploma sahteciliği, yalnızca bireysel bir etik ihlal olarak ele alınamayacak ölçüde, kurumsal güveni zedeleyen, adil rekabeti bozan ve kamusal kaynak kullanımını olumsuz etkileyen sistemik bir problemdir. Sahtecilik girişimleri; sahte belge üretimi, gerçek belgelerin içeriğinin değiştirilmesi, kimlik eşleştirme manipülasyonu ve kurumlar arası doğrulama boşluklarının suistimali gibi farklı formlarda ortaya çıkabilmektedir (Gökcan, 2009). Bu sorunlar, tekil kontrol noktasına dayalı doğrulama yaklaşımlarının yetersizliğini açık biçimde ortaya koymaktadır. Kurum merkezli ve kapalı sistemlerin, ulusal ölçekte güven üretme kapasitesi sınırlı kalmaktadır.

Blokzincir teknolojisi, dağıtık defter yapısı ve kriptografik bütünlük mekanizmaları sayesinde kayıtların sonradan değiştirilememesini sağlayarak belge doğrulama süreçleri için güçlü bir teknik temel sunmaktadır (Şafak et al., 2021; Cagigas et al., 2021). Bununla birlikte, eğitim verilerinin büyük bölümünün

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kayseri Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği, ORCID: 0000-0001-7766-6757

² Yüksek Lisans, Kayseri Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Siber Güvenlik Anabilim Dalı, ORCID: 0009-0002-8493-1859

kişisel veri niteliği taşıması “tam şeffaflık” ilkesine dayalı blokzincir yaklaşımlarının doğrudan uygulanmasını pratik ve hukuki açıdan sorunlu hâle getirmektedir (Alotaibi et al., 2025). Bu nedenle eğitim gibi düzenlemeye tabi alanlarda, blokzincirin sağladığı bütünlük ve denetlenebilirlik avantajlarını korurken kişisel veriyi minimize eden hibrit tasarımlar daha uygulanabilir görünmektedir.

Bu çalışma, bir uygulama ya da sistem raporu sunmaktan ziyade, Türkiye yükseköğretim sistemi için önerilen bir mimari ve yönetim çerçevesini kavramsal ve teknik boyutlarıyla ele almaktadır. Çalışmanın amacı, üniversiteler, mezunlar, işverenler ve düzenleyici kurumlar gibi temel paydaşların üzerinde uzlaşabileceği, dağıtık güven ilkesine dayanan bir diploma doğrulama modelini yapılandırmak ve bu modelin hayata geçirilmesine yönelik uygulanabilir bir yol haritası sunmaktır. Önerilen yaklaşımda başarının yalnızca teknik bileşenlere değil, üyelik yönetimi, politika belirleme, denetim, itiraz ve uyuşmazlık çözümü ile sürdürülebilir işletim süreçlerinin açıklığına bağlı olduğu varsayılmaktadır.

Amaç, Kapsam ve Çalışmanın Sınırları

Bu çalışmanın amacı, Türkiye yükseköğretim sistemi bağlamında diploma doğrulama süreçleri için üniversiteler arası kolektif güvene dayalı bir mimari ve yönetim çerçevesi önermektir. Önerilen sistemin kapsamı, diplomanın üretilmesi, kayıt önerisinin oluşturulması, kurumlar arası çoğunluk onayı ile kaydın kalıcı hale getirilmesi ve üçüncü taraf doğrulamasının gerçekleştirilmesi aşamalarını içermektedir. Bu kapsamda, diploma doğrulama sürecinin uçtan uca ele alınması hedeflenmekte; ancak kişisel veri niteliği taşıyan alanların zincir üzerinde tutulmaması temel bir tasarım ilkesi olarak benimsenmektedir. Not dökümü, ders içerikleri, T.C. kimlik numarası, adres gibi kişisel veriler zincir dışı bırakılmakta; doğrulamaya yetecek minimal meta veriler ve kriptografik özetler blokzincir üzerinde, kişisel veriler ise üniversitelerin kendi veri tabanlarında saklanmaktadır.

Önerilen yaklaşım, Kişisel Verilerin Korunması Kanunu (KVKK) kapsamında veri minimizasyonu ve amaçla sınırlılık ilkeleriyle uyumlu olacak şekilde tasarlanmıştır. Doğrulama süreci, “mezunun rızası” ve “yetkili sorgu” kavramları etrafında kurgulanmaktadır. Bu bağlamda, bir işverenin diploma doğrulaması gerçekleştirebilmesi için mezun tarafından oluşturulan bir doğrulama talebi veya izin kaydının bulunması gerekmektedir. Böylece kişisel veriye ilişkin kontrol, mümkün olduğunca veri sahibine yaklaştırılmakta ve doğrulama süreci rıza temelli bir çerçeveye oturtulmaktadır.

Çalışmada önerilen sistem, diploma kaydının nihai hâle gelmesi için konsorsiyum üyelerinin çoğunluk onayını şart koşan %51 konsorsiyum uzlaşısı politikası üzerine inşa edilmektedir. Bu eşik değer, tek bir kurumun kötü niyetli

veya hatalı bir işlemle sahte diploma kaydı üretebilmesini zorlaştırmayı amaçlamaktadır. Bununla birlikte, söz konusu yaklaşımın pratikte uygulanabilir olabilmesi için onay pencerelerinin tanımlanması, istisna yönetimi, uyumsuzluk çözümü ve denetim mekanizmalarının birlikte tasarlanması gerekmektedir. Bu yönüyle önerilen model, yalnızca teknik bir çözüm değil, aynı zamanda yönetim boyutu güçlü bir çerçeve olarak ele alınmaktadır.

Bu çalışma kapsamında aşağıdaki temel katkılar sunulmaktadır:

- %51 çoğunluk onayına dayalı, üniversiteler arası kolektif doğrulama yönetimi önerisi;
- Zincir-üzeri ve zincir-dışı veri yerleşimini esas alan, KVKK uyumunu merkezine alan bir gizlilik yaklaşımı;
- Kayıt, onay/uzlaş ve doğrulama ile erişim kontrolü işlevlerini ayırıştıran üç katmanlı akıllı sözleşme tasarımı;
- Kayıt silme yerine durum güncellemesine dayanan iptal ve düzeltme (revocation) süreçleri;

Bu bölümde sunulan çalışma, bilinçli olarak prototip geliştirme, üretim ortamı kurulumu veya performans ve güvenlik değerlendirmesi içermemektedir. Dolayısıyla sayısal performans sonuçları, ölçüm bulguları veya “kanıtlanmış” nitelendirmeler sunulmamaktadır. Önerilen model, üniversiteler arası iş birliği ve ortak yönetim gerektirdiğinden, kurumların operasyonel kapasitesi ve mevcut düzenleyici çerçeve uygulamanın başarısında belirleyici faktörlerdir. Ayrıca çalışma kapsamında, konsorsiyum üyelerinin davranışlarının tamamen iyi niyetli olduğu varsayılmamakta; çok sayıda kurumun koordineli biçimde kötü niyetli davranması gibi senaryoların olasılığı, etkisi ve tespit edilebilirliği değerlendirme kapsamına dâhil edilmektedir.

Akademik Belge Doğrulamada Mevcut Yaklaşımlar ve Literatürün Değerlendirilmesi

Akademik belge doğrulama alanında geliştirilen dijital çözümler, literatürde ağırlıklı olarak teknik uygulanabilirlik ve kayıt bütünlüğü perspektifinden ele alınmaktadır. Özellikle blokzincir teknolojisinin eğitim alanındaki kullanımına odaklanan çalışmalar; sertifika doğrulama, mikro-yeterliliklerin yönetimi, yaşam boyu öğrenme kayıtlarının taşınabilirliği ve uzaktan öğrenme ortamlarında kimlik ile katılım doğrulama gibi temalar etrafında yoğunlaşmaktadır (Yıldırım, 2018). Sharples ve Domingue, blokzinciri “entelektüel bir para birimi” olarak kavramsallaştırarak eğitim kayıtlarının demokratik, şeffaf ve merkeziyetsiz biçimde tutulabileceğini ileri sürmektedir (Sharples & Domingue, 2016). İngiltere Açık Üniversitesi tarafından yayımlanan İnovasyon Raporu’nda, blokzincirin orta ve uzun vadede eğitim alanında yüksek etki potansiyeline sahip

olduğu vurgulanmış; Nicosia Üniversitesi'nin sınav sertifikalarını Bitcoin blokzinciri üzerinde saklayan ilk yükseköğretim kurumu olduğu belirtilmiştir (Sharples et al., 2016).

Avrupa Komisyonu'nun "Blockchain in Education" başlıklı raporunda, kalıcı ve güvenli sertifikalar, otomatik tanıma ve kredi transferi, yaşam boyu öğrenme pasaportu ve eğitim kurumlarında kimlik doğrulama gibi sekiz farklı kullanım senaryosu tanımlanmıştır (Grech & Camilleri, 2017). EduCTX projesi, ECTS kredi transfer sisteminin Ark blokzinciri üzerinde uygulanabilirliğini inceleyerek bu alandaki erken örneklerden biri olmuştur (Turkanović et al., 2018). MIT Media Lab tarafından geliştirilen Blockcerts ve İngiltere Açık Üniversitesi'nin Ethereum tabanlı mikro-sertifika uygulamaları da blokzincirin sertifikalandırma süreçlerinde kullanımına yönelik açık kaynaklı yaklaşımlar sunmaktadır (Jirgensons & Kapenieks, 2018). Disciplina projesi ise gizlilik odaklı öğrenme kayıtları ve mezun takibini hedefleyen bir başka örnek olarak literatürde yer almaktadır (Kuvshinov et al., 2018).

Bununla birlikte literatürdeki çözümlerin önemli bir bölümü tek kurum odağında kurgulanmış, kurumlar arası kolektif doğrulama, uzlaş politikaları ve yönetim mekanizmaları gibi konulara sınırlı ölçüde değindiği görülmektedir. Bu durum, diploma doğrulama gibi ulusal ölçekte etki üreten süreçlerde, teknik tasarımların yanı sıra güvenin nasıl üretildiği ve paylaşıldığına ilişkin yönetim modellerinin daha sistematik biçimde ele alınması gerektiğine işaret etmektedir. Bu çalışmalar, blokzincirin eğitim alanındaki teknik potansiyelini ortaya koymakla birlikte, doğrulama süreçlerinin kurumsal ölçekte nasıl yönetileceği ve güvenin nasıl dağıtılacağı sorularını büyük ölçüde açık bırakmaktadır.

Blokzincir Teknolojisi ve Eğitime Uygulanması

Blokzincir teknolojisi, dağıtık defter yapısı, kriptografik özetler ve mutabakat protokolleri aracılığıyla kayıt bütünlüğü sağlamaktadır. Eğitim belgeleri bağlamında bu özellik, bir diplomanın veya sertifikanın sonradan değiştirilip değiştirilmediğinin tespit edilebilmesine imkân tanımaktadır. Ancak eğitim alanındaki gereksinimler, kripto para uygulamalarında görülen senaryolardan önemli ölçüde farklıdır. Eğitim sistemlerinde işlem hacmi, kullanıcı deneyimi ve mevzuata uyum beklentileri ön plana çıkmakta; doğrulama işlemlerinin hızlı olması, kullanıcıların karmaşık anahtar yönetimi süreçleriyle karşılaşmaması ve sistemlerin kurumsal uyumluluk gereklerine cevap verebilmesi beklenmektedir.

Blokzincir uygulamalarında "değiştirilemezlik" çoğu zaman temel bir avantaj olarak değerlendirilse de, eğitim belgelerinde iptal, düzeltme veya yeniden basım gibi zorunlu süreçler bulunmaktadır. Bu nedenle kayıt silme yaklaşımı yerine, önceki kaydı referanslayan yeni bir durum güncellemesi (iptal, düzeltme, yeniden basım gibi) benimsenmesi gerekmektedir. Bu yaklaşım, hem denetim izinin

korunmasını sağlamakta hem de doğrulama yapan taraflara belgenin geçerli sürümünün sunulmasına olanak tanımaktadır. Eğitim alanındaki blokzincir uygulamalarında bu tür yaşam döngüsü yönetimi, teknik tasarım kadar yönetim açısından da belirleyici bir unsur hâline gelmektedir.

Dijital Sertifika Doğrulama Sistemleri

Dijital sertifika doğrulama sistemleri genel olarak üç ana grupta sınıflandırılmaktadır: merkezi doğrulama portalları, kurum içi imzalı belge veya QR kod tabanlı çözümler ve dağıtık defter tabanlı yaklaşımlar. Merkezi portallar, hızlı uygulanabilir olmaları nedeniyle yaygın olarak tercih edilmekte; ancak tek hata noktası oluşturmaları ve yetki suistimaline açık olmaları önemli bir dezavantaj olarak öne çıkmaktadır. Kurum içi imzalı belge ve QR kod çözümleri belge dolaşımını kolaylaştırmakta, ancak üçüncü tarafların güvenilir anahtar dizinlerine erişiminin sınırlı olması durumunda doğrulama süreci karmaşıklaşabilmektedir.

Dağıtık defter tabanlı yaklaşımlar ise doğrulama anahtarlarını ve kayıt özetlerini ortak bir altyapıda tutarak entegrasyon maliyetlerini azaltmayı hedeflemektedir. Eğitim sistemlerinde blokzincir entegrasyonuna yönelik örnek çalışmalar, bu yaklaşımın potansiyel faydalarını ortaya koymakla birlikte, uygulama zorluklarını ve tasarım kararlarının önemini de göstermektedir (Karataş, 2018). Buna karşın, literatürdeki çözümlerin büyük bir kısmında kurumlar arası kolektif onay mekanizmaları ve yönetim süreçleri sınırlı biçimde ele alınmaktadır. Bu durum, diploma doğrulama gibi ulusal ölçekte etki üreten süreçlerde yalnızca teknik altyapının değil, güvenin nasıl üretildiği ve paylaşıldığının da sistematik biçimde tasarlanması gerektiğine işaret etmektedir.

Yapay Zekâ ve Blokzincir Entegrasyonu

Yapay zekâ ve blokzincirin birlikte kullanımı, özellikle güvenlik ve denetim gereksinimlerinin yüksek olduğu alanlarda giderek artan bir ilgi görmektedir (Kaur et al., 2023; Liang et al., 2020; Shaikh et al., 2025; Goundar & Gondal, 2025; Periyasamy et al., 2025; Alohalı et al., 2025; Ali et al., 2023). Bu iki teknolojinin birlikte ele alındığı çalışmalarda, anomali tespiti, sahtecilik eğilimlerinin izlenmesi, kimlik doğrulama süreçlerinde risk skorlaması ve olay müdahalesine yönelik karar destek mekanizmaları ön plana çıkmaktadır. Blokzincirin sunduğu değiştirilemez kayıt yapısı, yapay zekâ tabanlı analizler için güvenilir bir veri kaynağı oluşturabilmektedir.

Diploma doğrulama senaryosunda yapay zekâ; ağ içi davranışların izlenmesi (olağandışı kayıt önerileri, belirli düğümlerden gelen tekrarlı hatalar veya ret oranlarındaki ani artışlar) ve doğrulama talebi davranışlarının analizi (yüksek hacimli sorgular, şüpheli coğrafi dağılımlar, rıza mekanizmasını atlamaya yönelik girişimler) gibi alanlarda kullanılabilir. Bununla birlikte, bu

bileşen çalışmanın merkezinde konumlandırılmamaktadır. Yapay zekâ destekli analizler, zorunlu bir mimari bileşen olarak değil; sistemin güvenlik ve denetim olgunluğu arttıkça devreye alınabilecek, genişletilebilir bir alan olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle, yapay zekâ bu çalışma kapsamında destekleyici ve isteğe bağlı bir genişleme alanı olarak ele alınmaktadır.

Bu bölümde ele alınan çalışmalar, akademik belge doğrulama alanında blokzincir teknolojisinin teknik potansiyelini ve mevcut dijital doğrulama yaklaşımlarının sınırlılıklarını ortaya koymaktadır. Özellikle literatürdeki çözümlerin büyük ölçüde tek kurum odaklı kurgulanması, doğrulama süreçlerinde güvenin nasıl üretildiği ve kurumlar arası ölçekte nasıl paylaşıldığı sorularını açık bırakmaktadır. Türkiye yükseköğretim sistemi gibi çok paydaşlı ve düzenlemeye tabi bir bağlamda, bu boşluk yalnızca teknik bir eksiklik değil, aynı zamanda yönetim temelli bir problem alanına işaret etmektedir. Bu tespitler ışığında, “Önerilen Sistem Mimarisi ve Dağıtık Güven Modeli” başlığı altında üniversiteler arası kolektif doğrulamayı esas alan, dağıtık güven ilkesine dayalı ve gizlilik gereksinimlerini merkezine alan bir diploma doğrulama mimarisi ve yönetim modeli önerilmektedir.

Önerilen Sistem Mimarisi ve Dağıtık Güven Modeli

Bu bölümde, “Akademik Belge Doğrulamada Mevcut Yaklaşımlar ve Literatürün Değerlendirilmesi” başlığı altında ortaya konulan literatür değerlendirmesi ve mevcut yaklaşımların sınırlılıkları ışığında, Türkiye yükseköğretim sistemi için önerilen diploma doğrulama mimarisi ve buna eşlik eden yönetim modeli ayrıntılı biçimde sunulmaktadır. Önerilen yaklaşım, güvenin tekil bir kuruma merkezileştirilmesi yerine üniversiteler arası kolektif bir mekanizma ile üretilmesini esas almakta; teknik bileşenler ile yönetim unsurlarını birlikte ele almaktadır. Bu çerçevede, konsorsiyum modeli, çoğunluk esaslı uzlaşma mekanizması, hibrit veri yerleşimi ve yaşam döngüsü yönetimi bütüncül bir mimari yaklaşımın parçaları olarak ele alınmaktadır.

Önerilen sistemin tasarımında üç temel ilke belirleyici olmuştur. Birincisi, diploma doğrulama güveninin tek bir kuruma veya merkezi bir otoriteye dayandırılmaması; ikincisi, kişisel veri koruma gereksinimlerinin mimarinin merkezine yerleştirilmesi; üçüncüsü ise sistemin hem teknik hem de yönetim açısından denetlenebilir ve sürdürülebilir olmasıdır. Bu ilkeler doğrultusunda, izinli ve üniversitelerden oluşan bir konsorsiyum modeli benimsenmiştir.

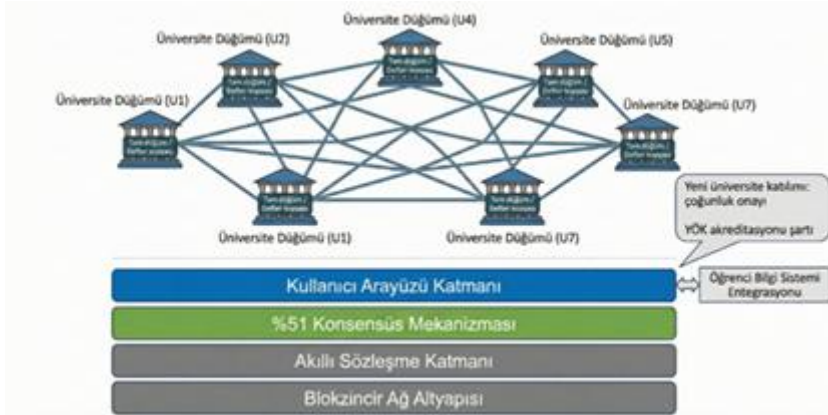
Çalışmada, konsorsiyum üyelerinin davranışlarının tamamen iyi niyetli olduğu varsayımı yapılmamaktadır. Tekil bir kurumun hatalı veya kötü niyetli işlem yapabilmesi olasılığı dikkate alınmakta; buna karşılık çok sayıda kurumun koordineli biçimde kötü niyetli davranmasının olasılığı, etkisi ve tespit edilebilirliği mimari ve yönetim düzeyinde değerlendirilmektedir. Bu yaklaşım,

sistemin güvenliğini yalnızca teknik önlemlere değil, aynı zamanda kurumsal karşılıklı denetim mekanizmalarına dayandırmaktadır.

Konsorsiyum Modeli ve Dağıtık Güven Yaklaşımı

Önerilen mimaride konsorsiyum, üniversitelerin eşit düğümler olarak yer aldığı ve diploma kayıtlarının kolektif biçimde değerlendirildiği izinli bir ağ yapısını ifade etmektedir. Her üniversite, diploma kaydını öneren veya diğer kurumların önerilerini değerlendiren bir aktör olarak sistemde rol almaktadır. Bu yapı, güvenin tekil bir otoriteye atfedilmesi yerine, kurumlar arası karşılıklı denetim yoluyla üretilmesini sağlamaktadır.

Dağıtık güven yaklaşımında, her onay veya ret kararı zaman damgalı olarak kaydedilmekte ve sonradan denetlenebilir bir iz oluşturmaktadır. Bu izler, hem kurumsal hesap verebilirliği artırmakta hem de kötü niyetli davranışlar için caydırıcı bir etki oluşturmaktadır. Böylece güven, yalnızca teknik bütünlükten değil, aynı zamanda şeffaf ve izlenebilir karar süreçlerinden beslenmektedir. Bu yaklaşım, şeffaflık ve hesap verebilirlik hedefleri için kayıtların açık, izlenebilir ve bütüncül sunumunu vurgulayan güncel bulgularla uyumludur (Alotaibi et al., 2025). Önerilen konsorsiyum yönetişimi ve güvenin dağıtıldığı noktalar Şekil 1’de özetlenmektedir.



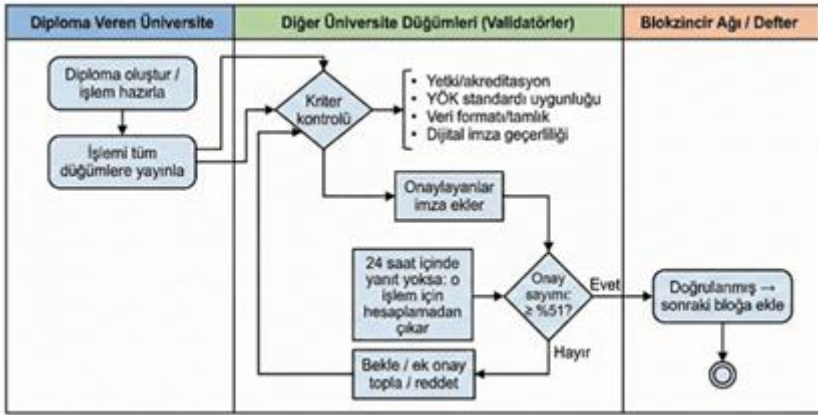
Şekil 1. Konsorsiyum modeli ve dağıtık güven yaklaşımı

%51 Konsorsiyum Uzlaş Mekanizması

Diploma kaydının nihai hâle gelmesi için önerilen uzlaş politikası, konsorsiyum üyelerinin çoğunluk onayını şart koşan %51 eşiğine dayanmaktadır. Bu mekanizmada, bir  niversite tarafından oluşturulan diploma kaydı  nerisi ağda paylaşılmakta; diğer  niversiteler tanımlı politika kurallarına göre onay

veya ret kararı vermektedir. Belirlenen eşik değeri sağlandığında kayıt “nihai” duruma geçmektedir.

%51 çoğunluk eşiği, anlaşılır ve uygulanabilir bir uzlaşma politikası sunmakla birlikte, pratik işletimde bazı zorluklar barındırmaktadır. Düşüm arızaları, akademik takvim farklılıkları ve kurumsal iş yükleri onay sürecini etkileyebilmektedir. Bu nedenle onay pencereleri, istisna yönetimi, ret gerekçelerinin kaydı ve itiraz süreçleri yönetim dokümanlarıyla açık biçimde tanımlanmalıdır. Bu yaklaşım, kolektif doğrulamanın formaliteye dönüşmesini engellemeyi ve karar süreçlerinin anlamlılığını korumayı amaçlamaktadır. Kolektif doğrulama akışının yüksek seviyeli görünümü Şekil 2’de sunulmaktadır.



Şekil 2. %51 uzlaşma mekanizması ile kolektif doğrulama akışı.

Genel Sistem Mimarisi: Zincir-Üzeri ve Zincir-Dışı Bileşenler

Önerilen mimari, zincir-üzeri ve zincir-dışı bileşenlerin bilinçli biçimde ayrıştırılmasına dayanmaktadır. Diploma belgesinin kendisi ve kişisel veriler zincir dışında, üniversitelerin kendi bilgi sistemlerinde tutulmaktadır. Blokzincir üzerinde ise yalnızca doğrulamaya yetecek minimal meta veriler, kriptografik özetler ve durum bilgileri yer almaktadır.

Bu ayırım, hem kişisel veri koruma gereksinimlerini karşılamakta hem de blokzincirin denetlenebilirlik ve bütünlük avantajlarını korumaktadır. Zincir-üzeri kayıtlar, belgenin varlığını ve bütünlüğünü kanıtlayan bir referans noktası işlevi görürken; zincir-dışı bileşenler, veri güncelleme ve erişim kontrolü gibi esnekliği gerektiren işlemleri üstlenmektedir.

Bu mimari ayrımı somutlaştırmak amacıyla, diploma doğrulama sürecinde kullanılan temel veri alanları ile bu alanların zincir-üzeri ve zincir-dışı yerleşimi Tablo 1’de özetlenmektedir. Tablo, kişisel veri içeren alanlar ile yalnızca

doğrulamaya yetecek minimal meta veriler arasındaki ayrımı açık biçimde göstermektedir.

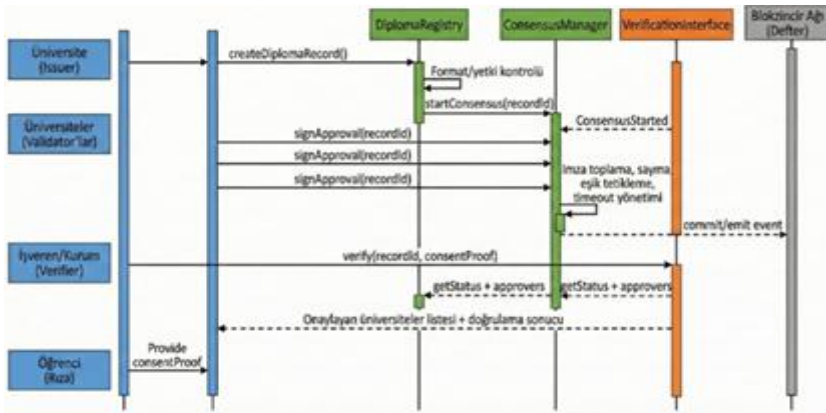
Alan	Yerleşim	Açıklama
diploma_id	Zincir-üzeri	Benzersiz diploma kimliği
issuer_id	Zincir-üzeri	İhraç eden üniversite kimliği
program_code	Zincir-üzeri	Program/bölüm kodu
grad_year	Zincir-üzeri	Mezuniyet yılı (gizlilik ihtiyacına göre hassasiyet)
credential_hash	Zincir-üzeri	Belgenin kriptografik özeti (hash)
status	Zincir-üzeri	Aktif/iptal/düzeltildi gibi durum
pii_payload	Zincir-dışı	Kişisel veriler (üniversite veri tabanında)
consent_record	Zincir-üzeri	Rıza olayları için minimize edilmiş kayıt

Tablo 1. Önerilen diploma kaydı veri alanları (özet)

Bu veri yerleşimi yaklaşımı, blokzincirin bütünlük ve denetlenebilirlik avantajlarını korurken, kişisel verilerin zincir dışında tutulmasına imkân tanımakta ve gizlilik ile mevzuat uyumu açısından esnek bir mimari temel oluşturmaktadır.

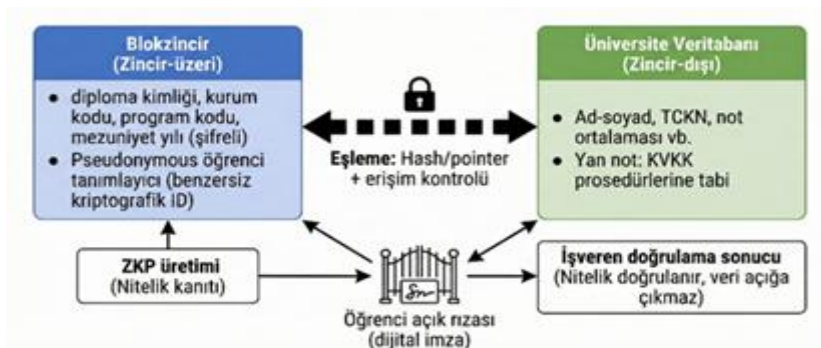
Akıllı Sözleşme Mimarisi

Akıllı sözleşme tasarımımda tek bir sözleşmede tüm fonksiyonları toplamak yerine katmanlı bir yaklaşım benimsenmektedir. Bu yapı, bakım kolaylığı ve denetlenebilirlik açısından avantaj sağlamaktadır. Birinci katman ‘kayıt’ katmanıdır. Diploma kaydına ilişkin minimal meta verilerin ve kriptografik özetlerin tanımlanmasından sorumludur. Kayıt şeması standartlaştırılarak sistemler arası birlikte çalışabilirlik desteklenmektedir. İkinci katman ‘onay/uzlaş’ katmanıdır. Bu katman, %51 çoğunluk eşiği, onay pencereleri, onay ve ret kararları ile durum makinelerini yönetmektedir. Uzlaş sürecine ilişkin tüm kararlar zaman damgalı olarak kaydedilmektedir. Üçüncü katman ise ‘doğrulama ve erişim kontrolü’ katmanıdır. Mezun rızasına dayalı doğrulama sorgularını ve yetkilendirme süreçlerini ele almaktadır. İşveren veya üçüncü taraf sorgularının yalnızca yetkili ve rızaya dayalı biçimde sonuç üretmesi bu katman aracılığıyla sağlanmaktadır. Katmanlar arası ilişkiler Şekil 3’te gösterilmektedir.



Gizlilik, KVKK Uyumu ve Hibrit Veri Yerleşimi

Eğitim belgeleri kişisel veri içerebildiğinden, sistem tasarımında “privacy by design” yaklaşımı temel alınmaktadır. Veri minimizasyonu ve amaçla sınırlılık ilkeleri doğrultusunda, kişisel verinin zincire yazılmaması temel kural olarak benimsenmiştir. Zincirde yalnızca özet ve doğrulamaya yetecek minimal bilgiler tutulmaktadır. Doğrulama süreci mezun rızasına dayalı olarak kurgulanmakta, rıza kapsamı, süresi ve iptali gibi unsurlar erişim kontrol mekanizmalarıyla desteklenmektedir. Bu yaklaşım, kişisel verinin kontrolünü mümkün olduğunca veri sahibine yaklaştırmayı hedeflemektedir. Zincir-üzeri ve zincir-dışı alanların ayrımı ile rıza temelli doğrulama yaklaşımı Şekil 4’te özetlenmektedir.



Rol, Yetki ve Erişim Kontrol Modeli

Önerilen sistemde roller ve yetkiler açık biçimde tanımlanmıştır. Üniversiteler diploma kaydı oluşturma ve

onaylama rollerini üstlenirken; mezunlar doğrulama taleplerine rıza verme yetkisine sahiptir. İşverenler ve üçüncü taraflar yalnızca rıza kapsamında doğrulama sorgusu gerçekleştirebilmektedir. Düzenleyici ve denetleyici aktörler ise politika belirleme ve denetim yetkileriyle sistemde yer almaktadır. Bu rol ve yetki dağılımı, Tablo 2’de özetlenen erişim kontrol modeliyle somutlaştırılmaktadır. Tanımlı roller, yetki suistimalini azaltmayı ve denetlenebilirliği artırmayı amaçlamaktadır.

Rol	Diploma oluşturma	Kurum onayı	Doğrulama sorgusu	Denetim/raporlama
Üniversite (İhraç)	Evet	Evet	Evet	Sınırlı
Üniversite (Doğrulayıcı)	Hayır	Evet	Evet	Sınırlı
Öğrenci/Mezun	Hayır	Hayır	Rıza ile	Hayır
İşveren/3. taraf	Hayır	Hayır	Rıza ile	Hayır
YÖK/Denetçi	Hayır	Politika	Gerekirse	Evet

Tablo 2. Rol ve yetki matrisi (öneri).

Diploma Yaşam Döngüsü: İptal, Düzeltme ve Revizyon

Diploma kayıtları, idari hata düzeltmesi, yargı kararları veya yeniden basım gibi nedenlerle yaşam döngüsü boyunca değişime uğrayabilmektedir. Blokzincirin doğası gereği kayıt silme yaklaşımı tercih edilmemekte; bunun yerine durum güncellemesine dayalı bir model benimsenmektedir. Her iptal veya düzeltme işlemi, önceki kaydı referanslayan yeni bir olay kaydı olarak zincire eklenmektedir.

Doğrulama istemcileri, bu yaşam döngüsünü dikkate alarak yalnızca “geçerli” durumda olan kayıtlar için olumlu sonuç üretmektedir. Bu yaklaşım, hem denetim izinin korunmasını hem de doğrulama sonuçlarının doğruluğunu sağlamaktadır.

Operasyonel Mimari ve İzleme

Konsorsiyum ağının güvenilir biçimde işletilebilmesi için izleme ve olay yönetimi mekanizmaları zorunludur. Düğüm sağlığı, onay bekleyen kayıt sayıları, işlem gecikmeleri ve hata oranları düzenli olarak izlenmelidir. Onay penceresini aşan kayıtlar için bildirim mekanizmaları tanımlanarak operasyonel müdahale imkânı sağlanmalıdır. Loglama ve raporlama süreçleri tasarlanırken kişisel verinin üretilmemesine özen gösterilmeli; log içeriği ve saklama süreleri politika dokümanlarıyla belirlenmelidir. Bu yaklaşım, sistemin sürdürülebilir ve denetlenebilir biçimde işletilmesine katkı sağlamaktadır.

Entegrasyon Katmanı ve Sistemler Arası Birlikte Çalışabilirlik

Konsorsiyum ağı, üniversitelerin mevcut öğrenci bilgi sistemleriyle entegre olmak zorundadır. Entegrasyon kademeli planlanmalıdır: önce meta verilerin

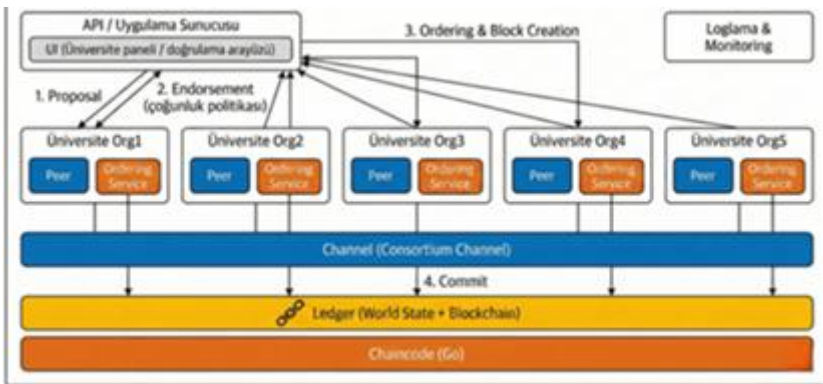
standardize edilmesi, ardından otomatik kayıt önerisi üretimi, daha sonra doğrulama API'lerinin işveren sistemleriyle entegrasyonu gibi aşamalar izlenebilmektedir.

Birlikte çalışabilirlik yalnızca teknik arayüzlerden ibaret değildir. Kurumlar arası veri sözlüğü, program kodları ve diploma türleri üzerinde uzlaşma sağlanmadıkça, aynı diplomaya ilişkin farklı yorumlar ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle entegrasyon katmanı, API yanında ortak şema ve politika yönetimi bileşenlerini de içermelidir.

Planlanan Prototip Geliştirme ve Değerlendirme Ortamı

Planlanan prototip ortamında, her üniversiteyi temsil eden blokzincir düğümleri, istemci katmanı ve izleme/raporlama bileşenlerinden oluşan çok katmanlı bir yapı öngörülmektedir. Üniversite düğümleri, konsorsiyum kanalına bağlı eş düğümler (peer) ve sıralama hizmeti (ordering service) aracılığıyla diploma kayıtlarının önerilmesi, onaylanması ve nihai hâle getirilmesini sağlamaktadır. İstemci katmanı; üniversite uygulamaları, mezun portalı ve işveren doğrulama arayüzlerini kapsamaktadır.

Prototipin, gerçek kişisel veri içermeyen sentetik meta veriler ile çalıştırılması hem etik ilkeler hem de KVKK açısından güvenli bir başlangıç sunmaktadır. Ayrıca ortamın, düğüm arızası, ağ gecikmesi ve geçici bağlantı kesintileri gibi koşulların simüle edilebileceği şekilde yapılandırılması önerilmektedir. Bu yaklaşım, önerilen mimarinin yalnızca ideal koşullarda değil, gerçekçi operasyonel senaryolarda da değerlendirilmesine imkân tanımaktadır. Planlanan prototip geliştirme ve değerlendirme ortamının yüksek seviyeli görünümü Şekil 5'te sunulmaktadır.



Şekil 5. Planlanan prototip geliştirme ve değerlendirme ortamı.

Performans Metrikleri ve Ölçeklenebilirlik (ölçüm yaklaşımı)

Prototip değerlendirmesinde ölçülmesi önerilen temel performans metrikleri; diploma kayıt önerisinden nihai duruma geçiş süresi (uzlaş gecikmesi), doğrulama sorgu gecikmesi, işlem verimi, düğüm sayısı arttıkça gecikme ve verim eğrileri ile zincir-üzeri depolama büyümesi olarak özetlenebilmektedir. Yük profilleri, mezuniyet dönemine özgü yoğun kayıt yükü ve işveren doğrulama taleplerinin baskın olduğu sorgu yükü senaryoları şeklinde ayrı ayrı modellenmelidir.

Ölçeklenebilirlik analizinde, düğüm sayısı, ağ gecikmesi ve düğüm arızası gibi parametrelerin sistematik biçimde değiştirilmesi önerilmektedir. Örneğin düğüm sayısı arttıkça uzlaş gecikmesinin nasıl değiştiği, belirli sayıda düğümün geçici olarak çevrimdışı olması durumunda uzlaşının nasıl etkilendiği ve tanımlanan onay pencerelerinin yeterli olup olmadığı gözlemlenebilmektedir. Bu tür analizler, önerilen mimarının hangi koşullarda sürdürülebilir olduğunu ortaya koymak açısından kritik öneme sahiptir.

Güvenlik Analizi ve Saldırı Direnci (tehdit modeli ve test planı)

Güvenlik değerlendirmesinde öncelikle kapsamlı bir tehdit modeli oluşturulmalıdır. Bu model; tek bir kurumun kötü niyetli kayıt önerisi oluşturması, birden fazla kurumun koordineli biçimde suistimal girişiminde bulunması, yetkisiz düğüm ekleme teşebbüsleri, akıllı sözleşme mantık hataları, kriptografik anahtar sızıntıları ve servis dışı bırakma saldırıları gibi senaryoları içermelidir. %51 çoğunluk eşiği, tekil kurum sahteciliğine karşı doğal bir bariyer sağlamakla birlikte, koordineli saldırılar ve anahtar yönetimi hâlâ kritik risk alanlarıdır.

Gelecekte yürütülecek çalışmalarda, akıllı sözleşmelerin kod denetimi, bağımsız güvenlik incelemeleri ve mümkün olduğunda biçimsel doğrulama yöntemleriyle güvenliğinin artırılması önerilmektedir. Operasyonel güvenlik açısından HSM kullanımı, çoklu imza politikaları, anahtar rotasyonu ve olay müdahale prosedürleri prototip aşamasının ayrılmaz bileşenleri olarak ele alınmalıdır.

Maliyet Analizi Yaklaşımı (öneri)

Maliyet analizi; altyapı kurulumu, işletim, güvenlik önlemleri ve entegrasyon faaliyetlerini kapsayan bir çerçevede ele alınmalıdır. Bunun yanında, mevcut diploma doğrulama süreçlerinin neden olduğu idari iş yükü ve gecikmelerden kaynaklanan dolaylı maliyetler de değerlendirmeye dâhil edilebilir. Maliyetin tek başına belirleyici bir kriter olmadığı; güven, hız ve mahremiyet kazanımlarının da sistemin ürettiği toplam değer kapsamında ele alınması gerektiği göz önünde bulundurulmalıdır.

Sonuç

Önerilen yaklaşımın temel avantajı, diploma doğrulama güvenini tek bir kuruma veya merkezi bir otoriteye bağlamak yerine, paydaşların çoğunluğuna dayalı kolektif bir mekanizma üzerinden üretmesidir. Bu yapı, tekil yetki suistimalini zorlaştırmakta ve üniversiteler arasında karşılıklı denetime dayalı bir güven ortamı oluşturmaktadır. Buna karşılık, kolektif onay sürecinin doğası gereği bir yönetim maliyeti ortaya çıkmaktadır. Onay pencereleri, istisna yönetimi ve itiraz süreçleri yeterince açık tanımlanmadığı takdirde, karar mekanizmalarının yavaşlaması veya onay süreçlerinin biçimsel bir formaliteye dönüşmesi riski bulunmaktadır.

Önerilen mimaride benimsenen hibrit gizlilik yaklaşımı, kişisel verilerin zincir üzerinde tutulmasını engelleyerek veri koruma açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bununla birlikte, zincir dışı bileşenlerin güvenliği sistemin bütünsel güven düzeyini belirleyen kritik bir unsurdur. Üniversitelerin kendi veri tabanlarının yetkisiz erişime karşı korunması, mezun rızası mekanizmasının kullanıcı dostu ve denetlenebilir biçimde tasarlanması ve doğrulama taleplerinin kötüye kullanımının önlenmesi bu bağlamda öncelikli konular olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca zincir üzerinde tutulan meta verilerin dolaylı çıkarım riskleri doğurabileceği göz önünde bulundurulmalı; zincir-üzeri alanların belirlenmesinde “en az veri” prensibi titizlikle uygulanmalıdır.

Bu çalışma kapsamında, Türkiye yükseköğretim sistemi için üniversiteler arası %51 çoğunluk onayına dayanan dağıtık bir güven modelini esas alan bir diploma doğrulama mimarisi önerilmektedir. Sunulan tasarım, sahte diploma kaydı oluşturmayı yapısal olarak zorlaştırmayı, doğrulama süreçlerini otomasyona uygun hâle getirmeyi ve KVKK odaklı veri minimizasyonu yaklaşımıyla kişisel verilerin korunmasını birlikte hedeflemektedir. Bu yönüyle çalışma, teknik mimari ile yönetim ve gizlilik gereksinimlerini birlikte ele alan bütüncül bir çerçeve sunmaktadır.

Kaynakça

- Ali, A., Ali, H., Saeed, A., Khan, A. A., Tin Tin, T., Assam, M., ... Mohamed, H. G. (2023). Blockchain-powered healthcare systems: Enhancing scalability and security with hybrid deep learning. *Sensors*, 23(18), 7740. doi:10.3390/s23187740
- Alohali, M. A., Aljebreen, M., Ahmad, N., Alahmari, S., Albouq, S. S., Alqazzaz, A., ... Said, Y. (2025). Privacy preserving blockchain integrated explainable artificial intelligence with two tier optimization for cyber threat detection and mitigation in the internet of things. *Scientific Reports*, 15, 36520. doi:10.1038/s41598-025-10601-1
- Alotaibi, E. M., Issa, H., & Codesso, M. (2025). Blockchain-based conceptual model for enhanced transparency in government records: A design science research approach. *International Journal of Information Management Data Insights*, 5(1), 100304. doi:10.1016/j.jjimei.2024.100304
- Cagigas, D., Clifton, J., Diaz-Fuentes, D., & Fernández-Gutiérrez, M. (2021). Blockchain for public services: A systematic literature review. *IEEE Access*, 9, 13904–13921. doi:10.1109/ACCESS.2021.3052019
- Goundar, S., & Gondal, I. (2025). AI-blockchain integration for real-time cybersecurity: System design and evaluation. *Journal of Cybersecurity and Privacy*, 5(3), 59. doi:10.3390/jcp5030059
- Gökcan, H. T. (2009). Resmi belgede sahtecilik suçu (TCK m. 204). *Ankara Barosu Dergisi*, (3), 93–126.
- Grech, A., & Camilleri, A. F. (2017). Blockchain in education. Luxembourg: Publications Office of the European Union. doi:10.2760/60649
- Jirgensons, M., & Kapenieks, J. (2018). Blockchain and the future of digital learning credential assessment and management. *Journal of Teacher Education for Sustainability*, 20(1), 145–156. doi:10.2478/jtes-2018-0009
- Karataş, E. (2018). Moodle öğrenme yönetim sistemi için Ethereum blok zinciri tabanlı belge doğrulama akıllı sözleşmesinin geliştirilmesi. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 11(4), 399–406. doi:10.17671/gazibtd.452686
- Kaur, R., Gabrijelčič, D., & Klobučar, T. (2023). Artificial intelligence for cybersecurity: Literature review and future research directions. *Information Fusion*, 97, 101804. doi:10.1016/j.inffus.2023.101804
- Kuvshinov, K., Nikiforov, I., Mostovoy, J., Mukhutdinov, D., Andreev, K., & Podtelkin, V. (2018). *Disciplina: Blockchain for education [Yellow paper]*. Retrieved from <https://disciplina.io/yellowpaper.pdf>

- Liang, C., Shanmugam, B., Azam, S., Karim, A., Islam, A., Zamani, M., ... Idris, N. B. (2020). Intrusion detection system for the internet of things based on blockchain and multi-agent systems. *Electronics*, 9(7), 1120. doi:10.3390/electronics9071120
- Periyasamy, S., Kaliyaperumal, P., Thirumalaisamy, M., Balusamy, B., Elumalai, T., Meena, V., ... Jadoun, V. K. (2025). Blockchain enabled collective and combined deep learning framework for COVID19 diagnosis. *Scientific Reports*, 15, 16527. doi:10.1038/s41598-025-00252-7
- Shaikh, M., Memon, S. A., Ebrahimi, A., & Wiil, U. K. (2025). A systematic literature review for blockchain-based healthcare implementations. *Healthcare*, 13(9), 1087. doi:10.3390/healthcare13091087
- Sharples, M., & Domingue, J. (2016). The blockchain and Kudos: A distributed system for educational record, reputation and reward. In K. Verbert, M. Sharples, & T. Klobučar (Eds.), *Adaptive and adaptable learning (EC-TEL 2016)* (pp. 490–496). Cham, Switzerland: Springer. doi:10.1007/978-3-319-45153-4_48
- Sharples, M., de Roock, R., Ferguson, R., Gaved, M., Herodotou, C., Koh, E., ... Wong, L. H. (2016). *Innovating pedagogy 2016: Open University innovation report 5*. The Open University. Retrieved from <http://www.open.ac.uk/innovating>
- Şafak, E., Arslan, Ç., Gözütok, M., & Köprülü, T. (2021). Dağıtık defter teknolojileri ve uygulama alanları üzerine bir inceleme. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (29), 36–45. doi:10.31590/ejosat.1011289
- Turkanović, M., Hölbl, M., Košič, K., Heričko, M., & Kamišalić, A. (2018). EduCTX: A blockchain-based higher education credit platform. *IEEE Access*, 6, 5112–5127. doi:10.1109/ACCESS.2018.2789929
- Yıldırım, H. (2018). Açık ve uzaktan öğrenmede blokzincir teknolojisinin kullanımı. *Açıköğretim Uygulamaları ve Araştırmaları Dergisi*, 4(3), 142–153.



BÖLÜM 2

Elektrik Makinelerinde Sargı Yalıtımına Etki Eden Stresler ve Arıza Süreçleri

Emre Demirel¹

Giriş

Elektrik makinelerinde sargı yalıtım sistemi, iletkenler arasındaki ve iletken–toprak arasındaki elektriksel ayrımı sürekli biçimde sağlayan, aynı zamanda ısı ve mekanik yükleri taşıyabilen çok katmanlı bir mühendislik bileşeni niteliğindedir. Stator sargılarında tur yalıtımı, oluk yalıtımı, ana yalıtım (groundwall), gerilim dengeleme katmanları, emprenye verniği ve yapısal destek elemanları birlikte çalışmakta; bu nedenle “yalıtım” kavramı tek bir malzemeden ziyade bütüncül bir sistem olarak ele alınmaktadır. Yalıtım sisteminin görevi yalnızca dielektrik dayanım sunmakla sınırlı kalmamakta, elektromanyetik kuvvetler altında geometrik bütünlüğü korumakta ve ısı yaşlanma koşullarında mekanik özelliklerini belirli bir aralıkta tutmaktadır (Zhou vd., 2024). Bu sistemde meydana gelen yerel bir zayıflama, sargı arızalarının önemli bir bölümünü tetikleyebildiğinden, yalıtım sağlığı elektrik makinelerinin güvenilirliği açısından kritik bir performans göstergesi niteliğindedir (Sirizzotti vd., 2025).

Yalıtım yaşlanmasının tek bir nedene indirgenmesi teknik açıdan yanıltıcı görülmektedir. Literatürde yaygın bir çerçeve olarak termal, elektriksel, mekanik ve çevresel streslerin birlikte yaşlanmaya etki ettiği, bu doğrultuda; stresler arası etkileşimlerin arıza hızını belirgin biçimde değiştirdiği ifade edilmektedir (Zhou vd., 2024). İnverter beslemeli sürücülerde darbe genişlik modülasyonu (pulse width modulation: PWM) ile üretilen hızlı kenarlı gerilim darbeleri, gerilim yükselme oranını (dv/dt) artırmakta ve yalıtımı hem yüksek frekanslı elektrik alan değişimine hem de tekrarlayan darbe gerilimlerine maruz bırakmaktadır (D’Amato vd., 2022). Buna paralel biçimde; yüksek güç yoğunluğu hedefleri stator akım yoğunluğunu ve ısı yükü artırmakta, bu da termal yaşlanma ile elektriksel bozulma süreçlerinin aynı zaman penceresinde ilerlemesine zemin hazırlamaktadır (Zhou vd., 2024; Zou vd., 2024).

Arıza süreçleri çoğu zaman ani bir “kırılma” olayı gibi görünmekle birlikte, genellikle uzun süreli bozulma birikimi üzerinden ilerlemektedir. Boşluk oluşumu, tabakalanma, yüzey kirlenmesi ve uç sargı gevşemesi gibi kusurlar önce yerel elektrik alanı büyötmekte; ardından kısmi deşarj (KD, İng. partial

¹ Dr., Yük. Elektrik Elektronik Mühendisi, İçtaş Yenilenebilir Enerji Üretim ve Ticaret A.Ş., Orcid:0000-0002-4664-9556

discharge: PD) etkinliği üzerinden yalıtımın kimyasal ve mekanik özelliklerinde geri dönüşsüz bozulma birikmektedir (Zou vd., 2024). Bu süreçte çevresel nem ve sıcaklık değışimleri KD başlama gerilimini (KD-BG, İng. PD inception voltage: PDIV) kaydırabilmekte, dolayısıyla aynı yalıtım sisteminin farklı iklim ve işletme koşullarında farklı hızlarda yaşlanması mümkündür (Elorza Azpiazu vd., 2023). Bu gözlem, arıza incelemesinin yalnızca arıza sonrası hasar fotoğrafına değil, arızaya giden yolun ölçülebilir göstergelerine dayanması gerektiğini göstermektedir (Sirizzotti vd., 2025).

Bu bölümde termal, elektriksel, mekanik, kimyasal ve çevresel stresler ayrı başlıklar altında açıklanmakta; her bir stresin yalıtım sisteminde oluşturduğu bozulma mekanizmaları arıza süreçlerinin “başlangıç–ilerleme–sonlanma” mantığı içinde ilişkilendirilmektedir. Ardından yalıtım durum izleme yaklaşımı, çevrimiçi ve çevrimdışı test–tanı yöntemleri üzerinden yapılandırılmakta ve Endüstri 4.0 perspektifinde sensörleşme, bağlantılılık, veri analitiği ile kestirimci bakım uygulamalarının yalıtım sağlığına nasıl bağlanabildiği tartışılmaktadır.

Kavramsal Çerçeve

Termal Stres

Termal stres, yalıtım sisteminin sürekli işletme sıcaklığı, sıcaklık dalgalanması ve yerel sıcak nokta (hot-spot) oluşumu ile belirlenmektedir. Yalıtım malzemelerinde ısı iletimi sınırlı olduğuunda, bakır kayıpları ve demir kayıplarının yarattığı ısı akısı yalıtımın belirli bölgelerinde yoğunlaşmakta; bu durum polimer matrisin kimyasal yapısında geri dönüşsüz değışimleri tetiklemektedir (Zhou vd., 2024). Termal yaşlanma sürecinde oksidasyon ve moleküler bağ yapısında değışim gerçekleşmekte; buna bağlı olarak dielektrik kayıpların arttığı ve mekanik dayanımın azaldığı raporlanmaktadır (Zhou vd., 2024). Bu doğrultuda; termal stres yalnızca “sıcaklık yüksekliği” ile değil, sıcaklık gradyanı ve döngü sayısı ile birlikte değeriendirilmesi gereken bir yaşlanma sürücüsü olarak görölmektedir (IEC, 2022a).

Termal döngülenme, stator olukları içinde iletken, yalıtım ve çekirdek malzemeleri arasında farklı ısıl genleşme katsayıları nedeniyle kesme gerilmeleri oluşturmaktadır. Bu kesme gerilmeleri tabakalanma (delaminasyon), mikro çatlak ve mikro boşluk oluşumu için uygun bir zemin yaratmakta; oluşan boşluklar ise elektriksel stres altında KD başlatma olasılığını artırmaktadır (Zou vd., 2024). Termal stresin elektriksel stresle bu şekilde “kusur köprüsü” kurması, bir sonraki başlıkta ele alınan elektrik alan yoğunlaşması ve KD mekanizmalarının saha koşullarında neden daha erken ortaya çıkabildiğini açıklamaktadır (Zhou vd., 2024).

Termal dayanımın değeriendirilmesinde standartlaştırılmış yaklaşımlar kullanılmaktadır. Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International

Electrotechnical Commission, IEC) tarafından yayımlanan IEC 60034-18-1 standardı, yalıtım sistemlerinin işlevsel değerlendirilmesine yönelik genel ilkeleri tanımlamakta ve termal yaşlanma modellerinin kurulmasında kullanılan yaklaşımları tartışmaktadır (IEC, 2022a). IEC 60034-18-32 standardı ise form-sargılı (form-wound) sargılar için elektriksel dayanımın değerlendirilmesinde test prosedürleri ve yeterlilik mantığını tanımlamakta, bu doğrultuda; test kurgusunun yalıtım sisteminin amaçlanan işletme koşullarını temsil etmesini hedeflemektedir (IEC, 2022b). Uygulamada termal stres yönetimi, tasarım aşamasında kayıp bütçesinin ve soğutma mimarisinin optimizasyonu ile başlamakta; işletme aşamasında ise sıcaklık trendinin izlenmesi ve sıcak nokta riskinin kontrol edilmesi ile sürdürülmektedir (Sirizzotti vd., 2025).

Elektriksel Stres

Elektriksel stres, yalıtım sisteminin maruz kaldığı elektrik alan şiddeti, alanın zamansal değişimi ve gerilim dalga biçiminin frekans içeriği ile şekillenmektedir. Stator ana yalıtımında boşluklar, bağ kusurları veya yüzey düzensizlikleri bulunduğu yerel elektrik alan yoğunlaşmaları oluşmakta; alanın kritik değeri aşması halinde KD olayları başlamaktadır (D'Amato vd., 2022). KD, yalıtımı tamamen köprülemeyen yerel boşalma olarak tanımlanmakta; buna rağmen tekrarlayan boşalmalar yalıtım yüzeyinde erozyon, karbonlaşma ve iletken yol oluşumu gibi birikimli etkiler üretmektedir (Zou vd., 2024). Bu birikimli etki, zaman içinde tur arası (turn-to-turn), faz-faz veya faz-toprak kısa devrelerine giden zincirin elektriksel halkasını oluşturmaktadır (Sirizzotti vd., 2025).

Modern sürücü sistemlerinde elektriksel stresin karakteri yalnızca nominal gerilim düzeyi ile açıklanamamaktadır. PWM kullanan inverterler yüksek dv/dt değerlerine sahip gerilim darbeleri üretmekte; kablo-motor empedans uyumsuzluğu ve yansıma etkileri motor uçlarında aşırı gerilim tepeleri oluşturabilmektedir (D'Amato vd., 2022). Bu tepeler özellikle tur yalıtımı üzerinde tekrarlayan darbe zorlanmasına yol açmakta ve darbe dayanımı zayıflayan bölgelerde KD etkinliği daha erken başlayabilmektedir (Zou vd., 2024). SiC tabanlı anahtarlama elemanlarının daha kısa yükselme süreleri üretebildiği, bu nedenle tekil gerilim darbelerinde bile bükümlü çiftlerde KD başlama karakteristiklerinin değiştiği raporlanmaktadır (D'Amato vd., 2022; Sirizzotti vd., 2025). Bu doğrultuda; elektriksel stres analizi yapılırken yalnızca “tepe gerilim” değil, dalga biçiminin yükselme süresi ve tekrarlama oranının birlikte ele alınması gerekmektedir (D'Amato vd., 2022).

Elektriksel stresin çevresel ve termal koşullara duyarlılığı da belirginleşmektedir. Nem ve sıcaklığın birlikte değiştiği koşullarda PDIV değerinin anlamlı ölçüde değiştiği ve bu nedenle laboratuvar koşullarında elde edilen PDIV değerlerinin saha koşullarına doğrudan taşınmasının dikkat gerektirdiği raporlanmaktadır (Elorza Azpiazu vd., 2023). Nem artışı yüzey

iletkenliğini yükseltmekte; bu doğrultuda; yüzey boşalması ve izlenme (tracking) süreçleri daha düşük alan şiddetlerinde etkinleşebilmektedir (Sirizzotti vd., 2025). Bu etki, termal stresin malzeme yapısını dönüştürmesi ile birleştiğinde, elektriksel yaşlanmanın “basamak” şeklinde hızlanmasına neden olabilmektedir (Zhou vd., 2024).

Elektriksel bozulma süreçlerinin izlenmesinde yüksek frekanslı işaretlerin kullanımı yaygınlaşmaktadır. İnverter beslemeli makinelerde anahtarlama geçişlerinden doğan yüksek frekanslı akım salınımlarının (ringing) yalıtım sağlığına duyarlı olduğu ve akım tepkisi üzerinden bozulma işaretlerinin çıkarılabildiği gösterilmektedir (Zanuso ve Peretti, 2022). Nötr gerilim tabanlı ve kaçak akım tabanlı çevrimiçi izleme yaklaşımlarının inverter beslemeli makinelerde karşılaştırıldığı ve her iki yaklaşımın farklı duyarlılık-gürültü dengeleri sunduğu bildirilmektedir (Zheng vd., 2024). Bu tür yöntemler, çevrimiçi KD ölçümü ile birlikte değerlendirildiğinde, elektriksel stresin yalnızca “boşalma var/yok” düzeyinde değil, bozulmanın eğimi ve lokalizasyonu düzeyinde de okunmasını mümkün kılmaktadır (Zou vd., 2024).

Elektriksel stresin azaltılmasına yönelik tasarım ve işletme seçenekleri de literatürde tartışılmaktadır. Gerilim dönüştürücü beslemeli makinelerde PD dirençli yalıtım sistemlerinin nitelendirme testleri IEC 60034-18-42 standardında tanımlanmaktadır (IEC, 2020). Darbe kenarlarını yumuşatan filtreleme yaklaşımları, uygun kablo seçimi ve yalıtım sisteminin inverter-dostu (inverter-duty) tasarlanması elektriksel zorlanmayı azaltmayı hedeflemektedir (D’Amato vd., 2022). Bunun yanı sıra; darbe yükselme süresini çoklu yükselme zamanı mantığı ile şekillendiren PWM yaklaşımlarının KD maruziyetini azaltabildiği raporlanmaktadır (Hammarström, 2020). Bu azaltım yaklaşımları, bir sonraki başlıkta ele alınan mekanik stres yönetimi ile birlikte kurgulandığında, yalıtım sisteminin bütüncül ömür performansını daha tutarlı biçimde iyileştirmektedir (Zhou vd., 2024).

Mekanik Stres

Mekanik stres, yalıtım sisteminin yalnızca dielektrik bir bariyer olmadığını, aynı zamanda dinamik yükler altında yapısal bir bileşen gibi davrandığını göstermektedir. Elektromanyetik kuvvetler ve harmonik içerik, özellikle uç sargı (end-winding) bölgelerinde titreşimi artırmakta; uygun olmayan destek yapıları veya gevşeme durumlarında sargı hareketi büyüyebilmektedir (Zhou vd., 2024). Uç sargı titreşimi, zamanla yalıtım aşınmasına, destek noktalarında sürtünme izine ve iletken yorulma hasarına yol açabilmekte; bu süreçte yalıtımın mekanik rijitliği azaldıkça hareket genliği daha da artabilmektedir (Zhou vd., 2024).

Mekanik zorlanma çoğu durumda termal ve elektriksel stres ile birlikte ilerlemektedir. Termal döngülenme ile gevrekleşen yalıtım, titreşim altında daha kolay çatlamakta; çatlaklar ve boşluklar elektrik alanının yoğunlaşması için yeni bölgeler oluşturarak KD aktivitesini artırmaktadır (Zou vd., 2024). Bu doğrultuda; mekanik stresin erken safhada yalıtım yüzeyinde aşınma ve yarı iletken katmanda bozulma biçiminde, geç safhada ise tur arası veya faz-toprak arızası biçiminde görünür hale geldiği değerlendirilmektedir (Zhou vd., 2024). Mekanik stresin elektriksel strese bu biçimde “kusur taşıyıcısı” olması, arıza süreçlerinin çoklu stres altında neden hızlandığını açıklamaktadır (Zhou vd., 2024; Sirizzotti vd., 2025).

Mekanik kaynaklı bozulmaların izlenmesinde yalnızca ivmeölçer tabanlı titreşim ölçümleri kullanılmamakta; KD ölçümünün mekanik semptom yakalama kapasitesi de önem taşımaktadır. Uç sargı gevşemesinin veya sargı çubuk titreşiminin KD işaretinde belirli desenler üretebildiği ve bu desenlerin çevrimiçi KD ölçümü üzerinden yorumlanabildiği raporlanmaktadır (Zou vd., 2024). Mekanik stresin çevresel kirlenme ile birlikte değerlendirilmesi gerektiği de vurgulanmaktadır; çünkü titreşim, iletken toz birikimini ve yüzeysel aşınmayı artırarak izlenme riskini büyütebilmektedir (Zhou vd., 2024). Bu etkileşim, mekanik stres yönetiminin çevresel koşullardan bağımsız düşünülmemesi gerektiğini göstermektedir (Sirizzotti vd., 2025).

Kimyasal Stres

Kimyasal stres, yalıtım malzemesinin polimerik yapısının reaktif türlerle etkileşimi üzerinden oluşmakta; bu etkileşim çoğu zaman termal ve elektriksel süreçlerin ürettiği yan ürünlerle beslenmektedir. KD olayları yerel ısınma ve iyonlaşma üzerinden kimyasal olarak saldırgan bir mikro ortam oluşturabilmekte; bu mikro ortam yalıtım yüzeyinde oksidatif bozulmayı hızlandırabilmektedir (Zhou vd., 2024). Yalıtım sisteminde kullanılan reçine ve bağlayıcı malzemelerin kimyasal kararlılığı azaldıkça, yalıtımın bağ yapısı zayıflamakta ve yüzey erozyonu daha hızlı ilerlemektedir (Zou vd., 2024).

Kimyasal etkiler saha koşullarında yalnızca boşalma yan ürünleri ile sınırlı kalmamaktadır. Soğutma akışkanları, yağ buharları, temizlik kimyasalları ve endüstriyel atmosferdeki kirleticiler yalıtımın yüzey enerji dengesini ve nem tutma eğilimini değiştirmekte; bu doğrultuda; çevresel streslerin bir bileşeni olarak kimyasal yük ortaya çıkmaktadır (Sirizzotti vd., 2025). Kimyasal maruziyetin artması, yüzey izlenmesi ve iletken film oluşumu üzerinden elektriksel bozulmayı hızlandırmakta; bu nedenle kimyasal stres çoğu zaman elektriksel stresin görünür hale gelmesinden önce risk işaretleri üretmektedir (Zou vd., 2024).

Kimyasal stresin yönetimi malzeme seçimi, uygun vernik/kaplama teknolojileri ve işletme ortamının kontrolü ile yürütülmektedir. Ancak sahada kimyasal bozulma çoğu zaman doğrudan ölçülemediğinden, yalıtım durum izleme yöntemlerinin kimyasal bozulmaya duyarlı göstergeler üretmesi kritik hale gelmektedir (Sirizzotti vd., 2025). Bu gereksinim, izleme yöntemlerinin yalnızca arıza sonrası doğrulama için değil, arıza öncesi risk yönetimi için yapılandırılması gerektiğini göstermektedir (Pliuhin vd., 2023).

Çevresel Stresler

Çevresel stresler, nem, toz, tuz sisi, sıcaklık–nem döngüsü, rakım ve atmosferik basınç gibi dış koşulların yalıtım sisteminin elektriksel ve mekanik davranışına doğrudan etki etmesi ile tanımlanmaktadır. Nem artışı yalıtım direncini düşürmekte ve dielektrik kayıpları artırmakta; bu doğrultuda; yüzey kaçak akımları daha erken oluşabilmektedir (Sirizzotti vd., 2025). Nem ve sıcaklığın birlikte değiştiği koşullarda PDIV değerinin değiştiği ve çevresel koşulların KD eşiğini kaydırıldığı deneysel olarak gösterilmektedir (Elorza Azpiazu vd., 2023). Bu olgu, termal stres altında oluşan mikro boşlukların çevresel koşullara bağlı olarak daha erken KD etkinliği üretebileceğini düşündürmektedir (Zhou vd., 2024).

Kirletici birikimi ve iletken tozlar, özellikle uç sargı bölgelerinde yüzey iletkenliğini artırmakta; bu durum yüzey boşalması ve izlenme süreçlerini kolaylaştırmaktadır (Zou vd., 2024). Bu stres alanı mekanik stres ile de ilişkilidir; çünkü titreşim birikmiş kirin yeniden dağılımını ve gerilim dengeleme katmanında aşınmayı artırabilmektedir (Zhou vd., 2024; Zou vd., 2024). Bu doğrultuda; çevresel stresler çoğu zaman tek başına değil, mekanik ve elektriksel streslerle birlikte arızayı hızlandıran bir çarpan olarak değerlendirilmektedir (Zhou vd., 2024).

Çevresel streslerin yönetiminde koruma sınıfı seçimi, havalandırma/filtrasyon ve bakım uygulamaları önemli rol oynamaktadır. Ancak çevresel koşulların değişkenliği, laboratuvar testlerinin saha gerçekliğine taşınmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle çevrimiçi ölçümlerin trend analizi ile desteklenmesi ve çevresel verinin sıcaklık, bağıl nem ve kirlenme göstergeleri ile birlikte yorumlanması gerekmektedir (Sirizzotti vd., 2025; Pliuhin vd., 2023). Çevresel veri ile yalıtım göstergelerinin birlikte ele alınması, bir sonraki başlıkta tartışılan arıza süreçlerinin hangi koşullarda hızlandığını açıklamakta ve karar destek kalitesini artırmaktadır (Sirizzotti vd., 2025).

Arıza Süreçleri

Streslerin arızaya dönüşümü çoğu zaman bir hasar birikimi dinamiği ile açıklanmaktadır. İlk aşamada üretim toleransları, montaj hataları veya işletme sırasında gelişen gevşeme ve çatlaklar nedeniyle yalıtım içinde mikro kusurlar

oluşmakta; bu kusurlar elektrik alan yoğunlaşmasını artırarak KD etkinliğine zemin hazırlamaktadır (Zou vd., 2024). İkinci aşamada tekrarlayan KD olayları, ısıl-mekanik döngüler ve çevresel nem etkisi yalıtımın lokal bölgelerinde erozyon ve iletken iz oluşumunu büyötmekte; bu süreçte dielektrik dayanımın azalması ile birlikte arıza olasılığı yükselmektedir (Zhou vd., 2024). Üçüncü aşamada ise yalıtım artık gerilimi taşıyamamakta ve tur arası kısa devre, faz-toprak arızası veya faz-faz arızası biçiminde işlev kaybı ortaya çıkmaktadır (Sirizzotti vd., 2025).

Arıza mekanizmasının hangi bölgede başlayacağı, streslerin uzaysal dağılımı ile belirlenmektedir. İnverter beslemeli düşük gerilim makinelerde tur yalıtımının darbe gerilimlerine daha hassas olduğu, orta ve yüksek gerilim makinelerde ise ana yalıtımın KD kaynaklı erozyona daha açık olduğu değerlendirilmektedir (D'Amato vd., 2022; Zou vd., 2024). Bunun yanı sıra; mekanik gevşeme ve uç sargı hareketi gerilim dengeleme katmanının bozulmasına ve uç bölgelerde boşalma riskinin artmasına yol açmaktadır (Zhou vd., 2024; Zou vd., 2024). Bu farklı arıza başlangıç bölgeleri, aynı makinede "aynı arıza tipi" görülse bile arıza yolunun farklı olabileceğini göstermekte; dolayısıyla tanı yaklaşımının tek bir test sonucuna dayandırılması riskli hale gelmektedir (Sirizzotti vd., 2025). Bu doğrultuda; arıza süreçlerinin yönetiminde kritik hedef, arızayı meydana getiren son olayın tespiti değil, arızaya giden zincirin erken halkalarının yakalanması olmaktadır. Bu yaklaşım, bir sonraki bölümde ele alınacak çevrimiçi/çevrimdışı test yöntemlerinin seçimini ve Endüstri 4.0 tabanlı analitik mimarinin kurgusunu doğrudan etkilemektedir (Rauscher vd., 2024; Sirizzotti vd., 2025).

Yalıtım Durum İzleme: Çevrimiçi ve Çevrimdışı Test/Tanı

Yalıtım durum izleme, yalıtım sisteminin yaşlanma seviyesinin tek seferlik ölçümlerle değil, zaman içinde değişen göstergeler üzerinden değerlendirilmesi yaklaşımına dayanmaktadır. Bu yaklaşımda amaç, farklı streslerin ortak çıktısı olan bozulma işaretlerini ölçmek ve bu işaretleri karar destek süreçlerine bağlamaktır (Sirizzotti vd., 2025). Seçilen yöntemler, ölçümün enerji altında yapılıp yapılmamasına göre çevrimiçi (online) ve çevrimdışı (offline) olarak sınıflandırılmakta; yöntemin seçimi ise makina tipi, işletme profili ve risk toleransına göre yapılandırılmaktadır (Zou vd., 2024). Bu doğrultuda; testler "arızayı kanıtlama" amacıyla değil, arızaya giden eğilimi yakalama amacıyla kurgulanmaktadır (Sirizzotti vd., 2025).

Çevrimdışı testler planlı duruşlarda uygulanmakta ve çoğu zaman daha kontrollü ölçüm koşulları sağlamaktadır. İzolasyon direnci ve polarizasyon davranışı, nem etkisi ve yüzey kaçak akımı hakkında dolaylı bilgi üretmekte; kayıp faktörü ($\tan \delta$) ve kapasitans ölçümleri ise dielektrik kayıplar ile katmanlar arası bozulma hakkında eğilim analizi sağlayabilmektedir (Sirizzotti vd., 2025). Darbe tabanlı sürgü (surge) testleri tur yalıtımının zayıflamasını yakalamayı

hedeflemekte; inverter beslemeli düşük gerilim makinelerde tur yalıtım riskinin artması nedeniyle bu testlerin önemi yükselmektedir (D'Amato vd., 2022). Çevrimdışı KD ölçümü, yalıtım içindeki boşalma etkinliğini doğrudan gözleyebilmekte; bunun yanı sıra; ortak-mod gerilim tabanlı çevrimdışı yaklaşımların değişken hızlı sürücü (variable frequency drive: VFD) beslemeli motorlarda şiddetli ana yalıtım bozulmasını arıza öncesinde yakalayabildiği gösterilmektedir (Shaikh vd., 2024).

Çevrimiçi izleme, makine enerji altında iken KD, kaçak akım, nötr gerilim, sıcaklık ve titreşim gibi göstergelerin sürekli veya periyodik toplanması ile yürütülmektedir. Stator sargı yalıtımında çevrimiçi KD ölçümünün uygulanma ve raporlama çerçevesi IEC 60034-27-2 standardında tanımlanmaktadır (IEC, 2023). Çevrimiçi KD ölçümü, yalnızca boşalma şiddetini değil, boşalma desenlerinin zamanla nasıl değiştiğini de göstermekte; bu doğrultuda; yüzey boşalması, iç boşalma ve uç bölge boşalması gibi süreçlerin ayrıştırılmasına yardımcı olabilmektedir (Zou vd., 2024). Çevrimiçi yöntemlerde nötr gerilim, kaçak akım veya anahtarlama geçişlerine dayalı sinyal çıkarımı yaklaşımları, yalıtım bozulmasını KD ölçümüne alternatif veya tamamlayıcı göstergelerle izlemeyi hedeflemekte; farklı yöntemlerin karşılaştırmalı performansları literatürde raporlanmaktadır (Zheng vd., 2024).

Çevrimiçi yöntemlerde sinyal işleme, en az ölçüm donanımı kadar kritik hale gelmektedir. PWM anahtarlama geçişleri, elektromanyetik girişim (EMI) ve tesis kaynaklı gürültü, KD işaretinin güvenilir biçimde ayrıştırılmasını zorlaştırmaktadır. Bu doğrultuda; gürültü koşullarında KD'nin arka plan sinyallerinden ayrıştırılmasına yönelik derin öğrenme temelli yaklaşımların ve veri artırma (data augmentation) stratejilerinin uygulanabildiği gösterilmektedir (Rauscher vd., 2024). Bu tür analitik yaklaşımlar, tek ölçüm anına dayalı kararların kırılganlığını azaltmakta; trend analizi ve çoklu veri seti üzerinden karar üretimini güçlendirmektedir (Sirizzotti vd., 2025).

Yalıtım durum izleme stratejisinin olgunlaşması, ölçümlerin kurumsal bakım süreçlerine bağlanması ile mümkün hale gelmektedir. Orta gerilim güç sistemlerinde bakım yönetimi açısından KD izleme tekniklerinin kapsamı, avantajları ve sınırlılıkları üzerine değerlendirmeler yapılmıştır (Altın vd., 2022). Bu doğrultuda; yalıtım göstergelerinin yalnızca teknik rapor çıktısı olarak değil, bakım önceliklendirme ve risk temelli planlama girdisi olarak ele alınması gerekmektedir. Kestirimci bakım ve arıza analizi uygulamalarında makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımların, saha verisini bakım kararlarına bağlamada işlevsel bir çerçeve sunduğu bildirilmektedir (Pirge ve Baştürk, 2025; Dündar vd., 2021).

Endüstri 4.0 Perspektifi ile Entegrasyon

Endüstri 4.0 yaklaşımı, yalıtım sağlığının izlenmesini tekil bir test etkinliği olmaktan çıkararak veri temelli bir varlık yönetimi sürecine dönüştürmektedir. Bu dönüşümde sahadan veri toplanması, verinin analitik modellerle işlenmesi ve bakım kararlarının performans hedefleriyle hizalanması merkezi rol oynamaktadır (Dündar vd., 2021; Pirge ve Baştürk, 2025). Elektrik makineleri açısından bu yaklaşım, yalıtım göstergelerinin işletme profili verileriyle birlikte yorumlanmasını ve arıza riskinin bakım planlarına ölçülebilir biçimde yansıtılmasını mümkün kılmaktadır (Sirizzotti vd., 2025).

Dijital ikiz (digital twin) yaklaşımı, fiziksel makinenin davranışını temsil eden bir sayısal modelin gerçek zamanlı veya yarı gerçek zamanlı ölçümlerle güncellenmesi üzerine kurulmaktadır. Yalıtım sağlığı açısından dijital ikiz; sıcaklık, yük, anahtarlama profili ve çevresel koşulları birlikte değerlendirerek stres birikimini hesaplayabilmekte ve bozulma göstergeleri ile model çıktıları arasında tutarlılık denetimi yapabilmektedir (Pliuhin vd., 2023). Bu doğrultuda; yalıtım arızalarının “aniden” ortaya çıktığı algısı zayıflamakta, arızaya giden sürecin ölçümler ve model çıktıları üzerinden izlenebilir olduğu düşüncesi güçlenmektedir (Sirizzotti vd., 2025). Dijital ikiz yaklaşımının, çevrimdışı test sonuçlarını çevrimiçi trendlerle birleştiren bir üst çatı sunması da mümkün görünmektedir (Pliuhin vd., 2023).

Yapay zeka destekli tanı, Endüstri 4.0 mimarisinin karar katmanını oluşturmaktadır. KD ölçümlerinde arka plan gürültüsünün baskın olduğu senaryolarda, derin öğrenme yöntemleriyle KD işaretlerinin gürültüden ayrıştırılabildiği ve veri artırma stratejileriyle sınıflandırma/ayırıştırma performansının iyileştirilebildiği gösterilmektedir (Rauscher vd., 2024). Bunun yanı sıra; kestirimci bakım literatüründe nesnelerin interneti (Internet of Things, IoT), bulut bilişim ve büyük veri analitiğinin bakım kararlarını hızlandıran ve daha tutarlı hale getiren bileşenler olarak ele alındığı vurgulanmaktadır (Dündar vd., 2021). Bu yaklaşımın yalıtım sağlığına taşınmasında temel gereksinim, ölçüm standardizasyonu ve etiketli veri kalitesidir; çünkü model performansı ölçüm varyasyonları ve gürültü karakteri değiştiğinde zayıflayabilmektedir (Sirizzotti vd., 2025).

Uygulama tarafında Endüstri 4.0 mimarisi, veri kalitesi ve süreç sahipliği gereksinimleri ile sınanmaktadır. KD ölçümü gibi yüksek frekanslı işaretler gürültüye duyarlı olduğundan, veri ön işleme, etiketleme ve model güncelleme süreçlerinin kurumsal bir yönetim altında yönetilmesi gerekmektedir (Dündar vd., 2021; Sirizzotti vd., 2025). Bu doğrultuda; üretim planı, duruş maliyeti ve güvenlik gereksinimleri gibi işletme parametreleri ile teknik göstergelerin birlikte optimize edilmesi gerekmektedir (Pirge ve Baştürk, 2025). Bu bütüncül yaklaşım, bölümün önceki kısımlarında tartışılan stres-bozulma-arıza zincirinin izlenebilir

hale gelmesini ve kurumsal ölçekte yönetilebilir bir risk çerçevesine dönüştürülmesini desteklemektedir (Sirizzotti vd., 2025).

Genel Değerlendirme

Bu bölümde ele alınan stres alanlarının ortak mesajı, yalıtım arızalarının tek bir parametreyle açıklanamayacağı ve değerlendirme disiplininin çoklu veri seti üzerinden kurulması gerektiğidir. Termal stresin mikro yapısal kusurları büyüttüğü, elektriksel stresin KD üzerinden birikimli erozyon ürettiği, mekanik stresin gevşeme ve aşınma yoluyla arıza zincirini hızlandırdığı ve çevresel/kimyasal etkilerin yüzey süreçlerini belirgin biçimde yönlendirdiği görülmektedir (Zhou vd., 2024; Zou vd., 2024; Sirizzotti vd., 2025). Bu doğrultuda; yalıtım yönetimi yalnızca tasarım safhasında yapılan malzeme seçimi ile sınırlı kalmamakta, işletme sırasında sürekli izleme ve trend yönetimi ile desteklenmektedir (IEC, 2023).

Kurumsal bakım mimarisinde hedef, KD etkinliği ve dielektrik davranış göstergelerini işletme profili ile birleştirerek arıza riskini erken safhada görünür kılmakta ve bakım kararlarını ölçülebilir performans göstergelerine bağlamaktadır. Derin öğrenme ve veri artırma temelli yaklaşımların KD işaretlerini gürültüden ayırtmada kullanılabildiği; dijital ikiz tabanlı stres birikimi hesaplarının ise yalıtım kondisyonunu öngörmeye yönelik bir çerçeve sunabildiği bildirilmektedir (Rauscher vd., 2024; Pliuhin vd., 2023). Bu yaklaşımın sahaya etkin biçimde taşınması için ölçüm standardizasyonu, veri kalitesi yönetimi ve karar süreçlerinin yönetişimi birlikte kurgulanmakta, yalıtım sağlığı yönetimi uçtan uca bir varlık yönetimi fonksiyonu olarak ele alınmaktadır (Sirizzotti vd., 2025; Dündar vd., 2021).

Kaynakça

- Altın, B., Çınar, M. A., ve Alboyacı, B. (2022). Orta gerilim güç sistemlerinde bakım yönetimi için kısmi deşarj izleme tekniklerinin incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 25(4), 1671–1679. doi:10.2339/politeknik.904546
- D'Amato, D., De Santis, M., Rizzo, R., ve Nardi, V. (2022). Impact of PWM voltage waveforms in high-speed drives: A survey on high-frequency motor models and partial discharge phenomenon. *Energies*, 15(4), 1406. doi:10.3390/en15041406
- Dündar, D. R., Sarıçiçek, İ., Çınar, E., ve Yazıcı, A. (2021). Kestirimci bakımda makine öğrenmesi: Literatür araştırması. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(2), 256–276. doi:10.31796/ogummf.873963
- Elorza Azpiazu, L., Almandoz, G., Egea, A., Ugalde, G., ve Badiola, X. (2023). Study of partial discharge inception voltage in inverter fed electric motor insulation systems. *Applied Sciences*, 13(4), 2417. doi:10.3390/app13042417
- Hammarström, T. (2020). Multi-rise time PWM: An approach to reduce partial discharge exposure in motor windings. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 27(2), 613–621. doi:10.1109/TDEI.2019.008446
- International Electrotechnical Commission. (2020). Rotating electrical machines – Part 18-42: Partial discharge resistant electrical insulation systems (Type II) used in rotating electrical machines fed from voltage converters – Qualification tests (IEC 60034-18-42:2017/AMD1:2020). Geneva, Switzerland: IEC.
- International Electrotechnical Commission. (2022a). Rotating electrical machines – Part 18-1: Functional evaluation of insulation systems – General guidelines (IEC 60034-18-1:2022). Geneva, Switzerland: IEC.
- International Electrotechnical Commission. (2022b). Rotating electrical machines – Part 18-32: Functional evaluation of insulation systems – Test procedures for form-wound windings – Thermal evaluation and electrical endurance test of insulation systems used in rotating electrical machines fed from voltage converters (IEC 60034-18-32:2022). Geneva, Switzerland: IEC.
- International Electrotechnical Commission. (2023). Rotating electrical machines – Part 27-2: On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines (IEC 60034-27-2:2023). Geneva, Switzerland: IEC.
- Pirge, İ. G., ve Baştürk, İ. (2025). Endüstriyel tesislerde makine öğrenmesi ile kestirimci bakım ve arıza analizleri. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 15(1), 119–133. doi:10.7212/karaelmasfen.1568736

- Pliuhin, V., Zaklinsky, V., Plankovsky, S., Tsegelnyk, A., Aksonov, S., ve Kombarov, V. (2023). A digital twin design of induction motor for insulation condition prediction. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*, 14, 17–22. doi:10.17683/ijomam/issue14.22
- Rauscher, A., Kaiser, J., Devaraju, M., ve Endisch, C. (2024). Deep learning and data augmentation for partial discharge detection in electrical machines. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 133, 108074. doi:10.1016/j.engappai.2024.108074
- Ruiz-Sarrio, J. E., Antonino-Daviu, J. A., Navarro-Navarro, A., ve Biot-Monterde, V. (2024). A review of broadband frequency techniques for insulation monitoring and diagnosis in rotating electrical machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 60(4), 6092–6102. doi:10.1109/TIA.2024.3384454
- Shaikh, M. F., Lee, H., Battulga, B., Lee, S. B., ve Stone, G. C. (2024). Detection of severe ground insulation deterioration before failure in VFD-fed motors using off-line common-mode voltage. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 60(1), 144–152. doi:10.1109/TIA.2023.3307344
- Sirizzotti, B., Di Tommaso, A. O., Pucci, M., ve Cirrincione, M. (2025). A review of stator insulation state-of-health monitoring methods. *Energies*, 18(14), 3758. doi:10.3390/en18143758
- Zanuso, G., ve Peretti, L. (2022). Evaluation of high-frequency current ringing measurements for insulation health monitoring in electrical machines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 37(4), 2637–2644. doi:10.1109/TEC.2022.3182364
- Zheng, D., Lu, G., Qu, J., Zhang, Y., ve Zhang, P. (2024). Comparative study of neutral-voltage-based and leakage-current-based online condition monitoring methods for stator insulation of inverter-fed machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 71(12), 16664–16674. doi:10.1109/TIE.2024.3379638
- Zhou, X., Giangrande, P., ve Galea, M. (2024). Insulation for rotating low-voltage electrical machines: Degradation, lifetime modeling, and accelerated aging tests. *Energies*, 17(9), 1987. doi:10.3390/en17091987
- Zou, Z., Liu, Z., ve Kang, J. (2024). Degradation mechanism and online electrical monitoring techniques of stator winding insulation of inverter-fed machines: A review. *World Electric Vehicle Journal*, 15(10), 444. doi:10.3390/wevj15100444



BÖLÜM 3

Lucifer Şifrelemesinin İncelenmesi

Fatma Elvan Sarıaydın¹ & Ercan Buluş²

GİRİŞ

IBM Şirketi, 1966 yılında müşterilerine şifreleme kullanarak veri güvenliği işlevi sunmaya karar verdi (Konheim, 2007). O dönemde IBM’de çalışmakta olan Alman asıllı bir fizikçi ve kriptograf Horst Feistel (1915-1990) ve ekibi, yine Feistel tarafından 1970’lerde tasarlanan Feistel şifreleme yöntemini kullanarak bir şifreleme geliştirdiler: LUCIFER. Geliştirdikleri bu şifreleme, açık metin (plaintext) verilerini M bitlik bloklar halinde şifreleyen bir birleşik blok şifrelemesidir (product block cipher) (Feistel, 1973). LUCIFER’in pek çok versiyonu bulunmaktadır, Sorkin (1984)’in çalışması ve Outerbridge (1986)’in çalışması örnek olarak verilebilir. Bu çalışmada, LUCIFER şifrelemesinin ticari bir türü olan ve IBM 2984 Cash Issuing Terminal makinesine entegre edilen versiyonunun çalışma prensibi ele alınacaktır (Konheim, 2007).

LUCIFER ŞİFRELEMESİ

LUCIFER şifrelemesi, IBM 2984 Cash Issuing Terminal sisteminde 32 bitlik bir girdi alacak şekilde tasarlanmıştır. 64 bitlik anahtar uzunluğuna sahiptir ve 16 tur boyunca şifrelemeyi tekrar eder. Bu çalışmada, LUCIFER şifrelemesindeki **bir tur (round)** açıklanacaktır.

İlk Adım: Anahtar Yazmacının Hazırlanması

64 bitlik şifreleme anahtarı, Şekil 1’deki gibi bir anahtar yazmacına (register) yüklenir ve sonrasında anahtar yazmacının en solundaki 36 bit belirlenir. Belirlenen 36 bitlik kısım 9 gruba bölünür ve her grup 4 bite sahip olur. Toplamda dokuz adet olan bu dörderli gruplar a, b, c, d, e, f, g, h ve i olarak adlandırılır. Bir tur bittikten sonra yazmaçtaki bitler 28 bit sola kaydırılır ve yeni dörtlüler en soldaki 36 bitten tekrar oluşturulur.

1 0 0 1 1 0 0 0 . . . 0 1 1 0

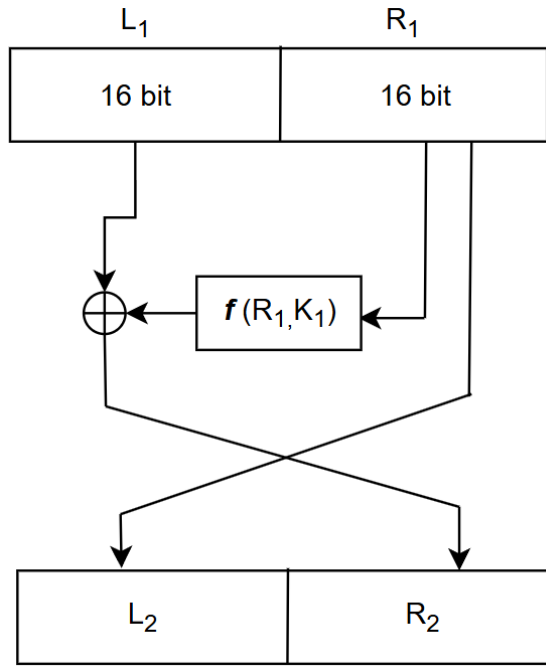
Şekil **Hata! Belgede belirtilen stilde metne rastlanmadı..** Anahtar yazmacı örneği

¹ Arş. Gör., Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, ORCID: 0009-0002-6400-2366

² Prof. Dr., Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, ORCID: 0000-0001-9442-6253

Şifresiz Metnin Eşit Parçalara Ayrılması

LUCIFER şifrelemesi Feistel şifrelemesi yapısını kullanır. Feistel şifrelemesinde, şifrelenecek olan açık metin iki eşit parçaya ayrılır ve sağ yarı **f fonksiyonuna** tur anahtarıyla birlikte verilir (Buluş, 2025). Daha sonra **f** fonksiyonundan elde edilen çıktı, sol yarı ile XOR işlemine tabi tutulur. Buradan elde edilen çıktı bir sonraki tur için şifrelenecek metnin sağ yarısını oluşturur. Sol yarısını ise iki eşit parçaya ayrılan açık metnin sağ yarısı oluşturur. LUCIFER şifrelemesinin ilgili versiyonunda 32 bitlik girdi ele alındığından Şekil 2’de gösterildiği üzere sol kısım (L_1) 16 bit ve sağ kısım 16 bit olmak üzere ayrılır.



Şekil 2. LUCIFER Şifrelemesi Mimarisi

f Fonksiyonunun İşlevi

f fonksiyonunda öncelikle girdinin sağ kısmı (R_1) dört adet dörtlüye bölünür ve anahtar yazmacından alınan **b**, **d**, **f** ve **h** dörtlüleri ile **mod 16** işlemi altında toplama işlemine girer. Şekil 3, bu durumu göstermektedir. Elde edilen çıktı (4 bitlik 4 grup), **S** kutularına verilir. **S** kutuları, blok şifreleme algoritmalarındaki tek doğrusal olmayan (non-linear) bileşendir. Blok şifrelemenin gücü büyük oranda bu kutuların cebirsel yapısına ve diferansiyel kriptanalize karşı direncine bağlıdır (Şahin, Buluş, Sakallı, 2005). LUCIFER’deki **S** kutusu tasarımı,

S kutuları için, S kutularına gelen her değer ve ilgili kutu için oluşacak çıktı önceden belirlenen tabloya bakarak anlaşılır. Şekil 5, bu tabloya bir örnektir. Örneğin, S_0 kutusuna gelen d değeri $(4)_{16}$ ise elde edilecek çıktı $(1)_{16}$ olur. Eğer d değeri S_1 kutusuna gelmiş olsaydı, elde edilecek çıktı $(C)_{16}$, yani $(1100)_2$ olacaktı.

IBM 2984 S Kutusu Çıktıları

d	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
$S_0(d)$	3	0	8	5	1	2	4	F	D	9	C	E	6	B	A	7
$S_1(d)$	8	D	1	6	C	4	F	B	3	2	5	4	9	0	7	A

Şekil 5. IBM 2984 S kutusu çıktıları (Konheim, 2007)

S kutularından elde edilen çıktılar daha sonra permütasyon kutularına verilir. Permütasyon kutularında c, e, g ve i dörtlüleri kullanılır. Burada yapılan işlem tam olarak bir permütasyon olarak adlandırılmaz. Bu işlem **anahtar bağımlı doğrusal dönüşüm (key-dependent linear transformation)** olarak adlandırılır. Şekil 6, doğrusal dönüşüm formüllerini göstermektedir.

S kutularından elde edilen dörtlüler T_0, T_1, T_2 ve T_3 olarak adlandırılır. Bu dörtlüler, P_0, P_1, P_2 ve P_3 dörtlülerine dönüştürülür. Bu dönüşüm yapılırken her bir P dörtlüsünün bitleri ayrı ayrı hesaplanır. Örnek olarak, P_0 dörtlüsünün sıfırıncı biti $P_{0,0} = T_{0,0}i'_0 + T_{1,0}g_0$ formülü ile hesaplanır. Burada, $T_{0,0}$ ve i'_0 değerleri **AND** işlemine girer. $T_{1,0}$ ve g_0 değerleri de **AND** işlemine girer ve çıkan bu iki sonuç **OR** işlemine girdikten sonra $P_{0,0}$ biti hesaplanmış olur. Tüm dörtlülerin tüm bitleri için ayrı ayrı hesaplama Şekil 6'da gösterildiği gibi bir tabloya bakarak yapılır ve sonrasında f fonksiyonundan çıkılır.

IBM 2984 P Kutusu Dönüşümü

$P_{0,0} = T_{0,0}i'_0 + T_{1,0}g_0$	$P_{0,1} = T_{3,1}c'_1 + T_{2,1}e_1$	$P_{0,2} = T_{2,2}e'_2 + T_{3,2}c_2$	$P_{0,3} = T_{1,3}g'_3 + T_{0,3}i_3$
$P_{1,0} = T_{1,0}g'_0 + T_{2,0}e_0$	$P_{1,1} = T_{0,1}i'_1 + T_{3,1}c_1$	$P_{1,2} = T_{3,2}c'_2 + T_{0,2}i_2$	$P_{1,3} = T_{2,3}e'_3 + T_{1,3}g_3$
$P_{2,0} = T_{2,0}e'_0 + T_{3,0}c_0$	$P_{2,1} = T_{1,1}g'_1 + T_{0,1}i_1$	$P_{2,2} = T_{0,2}i'_2 + T_{1,2}g_2$	$P_{2,3} = T_{3,3}c'_3 + T_{2,3}e_3$
$P_{3,0} = T_{3,0}c'_0 + T_{0,0}i_0$	$P_{3,1} = T_{2,1}e'_1 + T_{1,1}g_1$	$P_{3,2} = T_{1,2}g'_2 + T_{2,2}e_2$	$P_{3,3} = T_{0,3}i'_3 + T_{3,3}c_3$

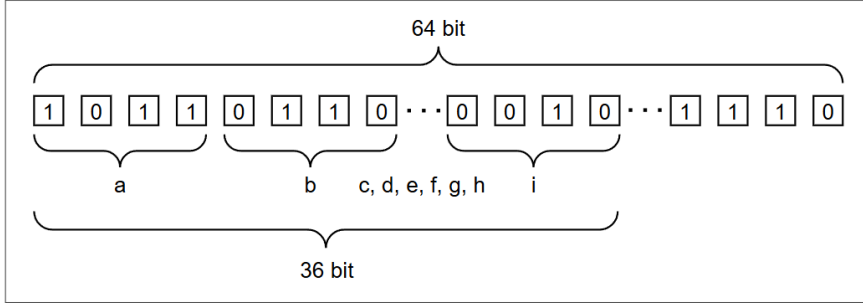
Şekil 6. Permütasyon kutusu dönüşüm tablosu (Konheim, 2007)

XOR İşlemi ve Yer Değiştirme

Tamamlanan dönüşümler (P_0, P_1, P_2 ve P_3), girdinin sol kısmı ile XOR işlemine tabi tutulur ve elde edilen çıktı sağ tarafa koyulur. Sol tarafa ise açık metnin ikiye bölünmüş kısımlarından biri olan sağ taraf, hiçbir işleme girmeden direkt koyulur. Böylelikle LUCIFER şifrelemesindeki bir tur tamamlanmış olur. Bu durumu, Şekil 2 açıklamaktadır.

Örnek ve Çözümü

32 bitlik açık metnimiz **01011101010110100101001011110100** olsun. Şifreleme anahtarımızın ilk 36 biti **101101101110000101101010101000110010** olarak belirlenmiş olsun. Bu durumda, birinci turu gerçekleştirmek için ilk önce şifreleme anahtarını anahtar yazmacına yerleştirmek gerekir. Sonrasında, bu yazmacın en solundaki 36 bit alınır ve en soldan başlayarak 9 eşit gruba bölünür. Bunun sonucunda her grup 4 bite sahip olacaktır. Gruplama stratejisi Şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 7. Anahtar yazmacı gruplama stratejisi

Gruplama işlemi sonucunda oluşan dörtlülerin değerleri aşağıdaki gibi olur:

a: **1011**, b: **0110**, c: **1110**, d: **0001**, e: **0110**, f: **1010**, g: **1010**, h: **0011**, i: **0010**
(1)

Dörtlüler elde edildikten sonra, açık metin iki eşit parçaya bölünür: 16 bit sol, 16 bit sağ tarafa ayrılacak şekilde iki eşit parça oluşur. Şekil 2 bunu göstermektedir. Sağ taraftaki 16 bit f fonksiyonuna verilir. Çözdüğümüz örneğe göre verilen 16 bit **0101001011110100** olur. f fonksiyonu kendisine verilen 16 biti öncelikle 4 eşit parçaya böler ve her parça 4 adet bit içerir. Buna göre, parçalar şu şekilde oluşur:

RD3: **0101**, RD2: **0010**, RD1: **1111**, RD0: **0100**

RD3 dörtlüsünün b dörtlüsü ile mod 16’da toplamı: **(0101) + (0110) mod 16 = 1011**
(2)

RD2 dörtlüsünün d dörtlüsü ile mod 16’da toplamı: **(0010) + (0001) mod 16 = 0100**
(3)

RD1 dörtlüsünün f dörtlüsü ile mod 16’da toplamı: **(1111) + (1010) mod 16 = 1001**
(4)

RD0 dörtlüsünün h dörtlüsü ile mod 16’da toplamı: **(0100) + (0011) mod 16 = 0111**
(5)

Elde edilen dörtlülerden **1011** (denk.2), a dörtlüsünün (denk.1) 3. bitine göre (RD3 olduğu için), **0100** dörtlüsü (denk.3) a dörtlüsünün 2. bitine göre (RD2 olduğu için), **1001** dörtlüsü (denk.4) a dörtlüsünün 1. bitine göre, **0111** dörtlüsü (denk.5) ise a dörtlüsünün 0. bitine göre S kutularına verilir.

a: **1011** olduğundan dolayı, RD3 S_1 kutusuna, RD2 S_0 kutusuna, RD1 S_1 kutusuna ve RD0 S_1 kutusuna verilir. Şekil 5'e göre bu kutulara verilen değerlerden elde edilecek yeni değerler:

RD3 için:

Gelen d değeri $(1011)_2 = (B)_{16}$ olduğundan S_1 kutusunun vereceği değer $(4)_{16} = (0100)_2$

RD2 için:

Gelen d değeri $(0100)_2 = (4)_{16}$ olduğundan S_0 kutusunun vereceği değer $(1)_{16} = (0001)_2$

RD1 için:

Gelen d değeri $(1001)_2 = (9)_{16}$ olduğundan S_1 kutusunun vereceği değer $(2)_{16} = (0010)_2$

RD0 için:

Gelen d değeri $(0111)_2 = (7)_{16}$ olduğundan S_0 kutusunun vereceği değer $(B)_{16} = (1011)_2$ olur.

S kutularının çıktıları: $T_0 = 1011$, $T_1 = 0010$, $T_2 = 0001$, $T_3 = 0100$ olur. S kutularından elde edilen çıktılar permütasyon kutularına verilir. Her bir T dörtlüsünün her bir biti tek tek hesaplanacaktır.

Not: $T_{0,0}$, T_0 dörtlüsünün sıfıncı bitini temsil ederken, $T_{1,0}$ ise T_1 dörtlüsünün sıfıncı bitini temsil eder.

$$P_{0,0} = T_{0,0}i'_0 + T_{1,0}g_0 \text{ doğrusal dönüşümünden, } P_{0,0} = 1 \cdot 1 \oplus 0 \cdot 0 = 1 \quad (6)$$

$$P_{0,1} = T_{3,1}c'_1 + T_{2,1}e_1 \text{ doğrusal dönüşümünden, } P_{0,1} = 0 \cdot 0 \oplus 0 \cdot 1 = 0 \quad (7)$$

elde edilir.

Bütün bitler için doğrusal dönüşümler (denk.6, denk.7) uygulandığında elde edilen 16 bitlik çıktı **1010000011000101** olur. f fonksiyonundan elde edilen bu çıktı açık metnin sol tarafı ile XOR işlemine tabi tutulacağından:

$$\begin{array}{l} 0101110101011010 \oplus 1010000011000101 = \\ 1111110110011111 = R_2 \end{array} \quad (8)$$

elde edilir. Bu çıktı (denk.8), sağ tarafa konulurken, sol tarafa açık metnin sağ tarafı konulur, böylelikle bir tur tamamlanmış olur. Anahtar yazmacı 28 bit sola kaydırılır ve bir sonraki tura geçilir.

Geliştirilebilir Noktalar

LUCIFER şifrelemesinin IBM 2984 uygulaması için özelleştirilen bu spesifik versiyonu, dönemine göre devrimsel olsa da modern kriptanaliz yöntemleri ve donanım imkanları göz önüne alındığında bazı kritik iyileştirmelere ihtiyaç duymaktadır:

- **Girdi ve Anahtar Boyutunun Artırılması:** İncelenen versiyonda kullanılan 32 bitlik blok boyutu 2^{32} farklı değere sahip olabilir ve oluşacak çıktı yine 2^{32} farklı değere sahip olur. Farklı girdilerin aynı çıktıyı üretmesi bir çakışmayı (collision) ifade eder. Bu durumda girdiler ve çıktılar incelenerek aradaki şifreleme yapısı ortaya çıkarılabilir. Doğum günü paradoksundan (birthday paradox) hareketle ortaya çıkarılan doğum günü saldırısı (birthday attacks) göz önüne alındığında bu olasılık aslında $2^{32/2}$, yani 2^{16} olacaktır ve bu da 65535 adet blokun incelenip aralarındaki ilişkinin bulunabileceği anlamına gelir. Blok boyutunun 128 bit veya üzerine çıkarılması, çakışma riskini minimize edecektir. Ayrıca 64 bitlik anahtar uzunluğu, kaba kuvvet (brute-force) saldırılarıyla kısa sürede kırılabilir; bu değer en az 128 veya 256 bite çıkarılması gerekmektedir.
- **S-Kutularının Optimizasyonu:** Algoritmada kullanılan S-kutuları (S-boxes), modern diferansiyel kriptanaliz ve lineer kriptanaliz yöntemlerine karşı yeterince dirençli olmayabilir. S-kutularının cebirsel karmaşıklığının artırılması ve çıkış bitleri arasındaki korelasyonun minimuma indirilmesi, algoritmanın matematiksel güvenliğini artıracaktır.
- **Anahtar Planlamasının (Key Schedule) Güçlendirilmesi:** Mevcut yapıda anahtarın sadece 28 bit sola kaydırılmasıyla elde edilen tur anahtarları, anahtar bitleri arasında düşük bir yayılmaya (diffusion) neden olur. Daha karmaşık bir anahtar genişletme algoritması kullanılarak, anahtarın her bir bitinin her turdaki şifreleme üzerindeki etkisi artırılabilir.

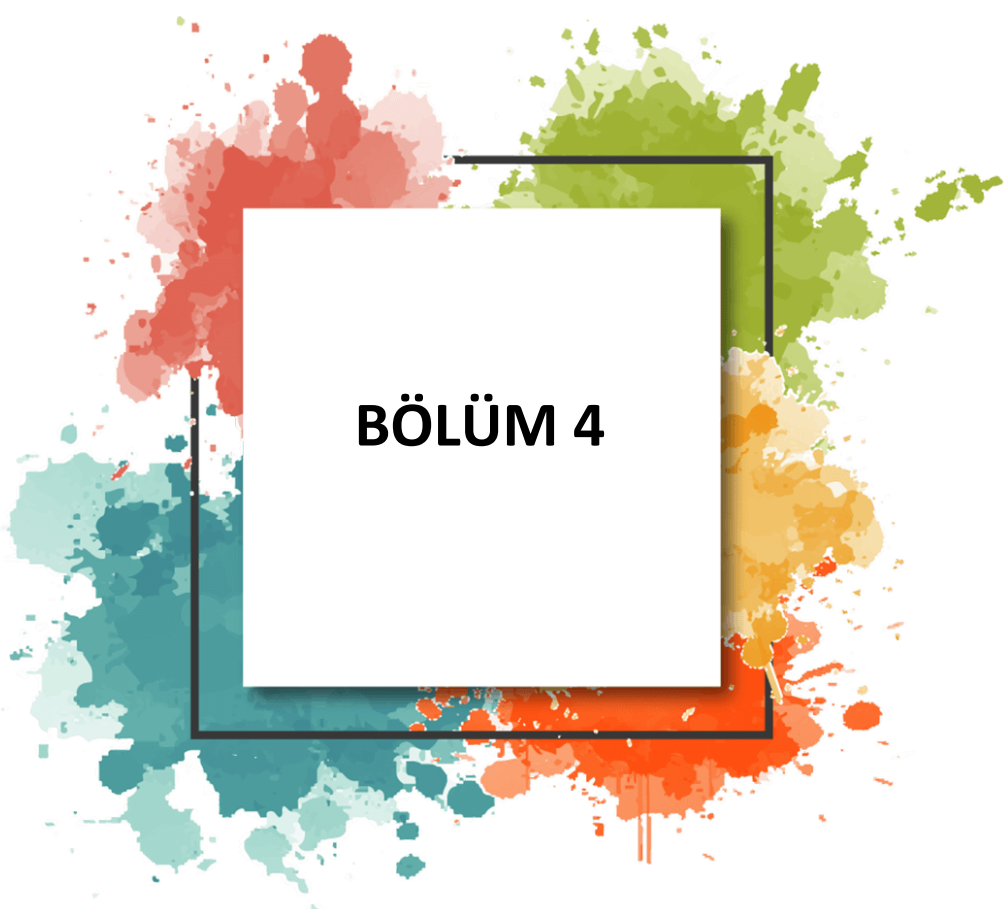
- **Tur Sayısının Optimize Edilmesi:** 16 tur Feistel yapısı için standart bir değer olsa da, blok ve anahtar boyutu büyütüldüğünde bu sayının artırılması, istatistiksel analiz yöntemlerini daha zor hale getirecektir.

SONUÇ

LUCIFER, 1970'lerin başında IBM bünyesinde geliştirildiğinde, sadece bir veri şifreleme algoritması değil, aynı zamanda sivil alanda kullanılan kriptografinin kaderini değiştiren bir devrim niteliğindeydi. IBM 2984 uygulaması ise LUCIFER'in sadece kağıt üzerinde matematiksel bir model olmadığını, aynı zamanda kısıtlı donanım kaynaklarında da çalışabildiğini kanıtladı. LUCIFER, Feistel yapısını kullanan ilk şifreleme olmasından dolayı önemli bir yere sahiptir. Bu yapı sayesinde, Shannon (1949)'ın önerdiği karıştırma (confusion) ve yayılma (diffusion) ilkelerini başarıyla uygular. Algoritmanın ilk sürümlerindeki bazı tasarım kısıtlılıkları, modern kriptografinin en önemli standartlarından biri olan DES'in doğuşuna ve S kutularının cebirsel analizlerinin derinleşmesine öncülük etmiştir. Sonuç olarak, LUCIFER sadece ticari bir ürün değil, aynı zamanda üniversitelerin kriptolojiye aktif katılımın ve NSA gibi kurumların standartlarını belirlemesine yol açan akademik bir dönüm noktasıdır.

KAYNAKÇA

- Konheim, A. G. (2007). Computer Security and Cryptography. *John Wiley & Sons, Inc.*, 283-287.
- Feistel H. (1973). Cryptography and Computer Privacy. *Scientific American*.
- Sorkin A. (1984). Lucifer, a cryptographic algorithm. *Cryptologia*, 8, 22-42.
- Outerbridge R. (1986) Some design criteria for Feistel-cipher key schedules. *Cryptologia*, 10, 142-156.
- Shannon C. E. (1949). Communication Theory of Secrecy Systems. *Bell System Technical Journal*, 28, 656–715.
- Buluş E. (2025). Feistel Şifreleme Yönteminin İncelenmesi. *Mühendislik alanında akademik araştırmalar içinde* (5-13). Ankara: Platanus Publishing.
- Şahin A., Buluş E., & Sakallı M. T. (2005). Modern blok şifreleme algoritmalarının gücünün incelenmesi. 2. *Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongresi (MBGAK'2005) Bildiri Kitapçığı içinde* (86-92). İstanbul, Türkiye.



BÖLÜM 4

Performansa Dayalı Deprem Mühendisliği Perspektifinde Orta Hasarlı Betonarme ve Yığma Yapıların Analizi, Onarımı ve Sismik Güçlendirilmesi: Teorik Temeller, Uygulama Prosedürleri ve Karşılaştırmalı Değerlendirmeler

Mehmet Şahin Duymuş¹

1. GİRİŞ

1.1. Yapısal Güçlendirmenin Önemi ve Gerekliliği

Depremler, toplumların fiziksel altyapısını ve sosyal dokusunu derinden etkileyen ve kent hafızası dediğimiz şehrin varoluş sürecindeki geçmişini silebilen doğal afetlerdir. Türkiye, Kuzey Anadolu Fay Hattı ve Doğu Anadolu Fay Hattı gibi aktif tektonik hatlar üzerinde konumlanması nedeniyle yüksek sismik tehlike altındadır (Paulay & Priestley, 1992). 6 Şubat 2023'te yaşadığımız o büyük felakette, Türkiye'nin 11 ili, tam 124 ilçesi, 6 bin 929 köy ve mahallesi ağır yıkım gördü. Bu yıkımlar maalesef 53 bin 537 canımıza mal oldu, 107 bin 213 vatandaşımız da yaralandı (*AFAD Kahramanmaraş Depremi Raporu 02.06.2023*). Yaşanan depremler 817.548 yapıda en az orta hasar ve üzeri hasara neden olmuştur (*T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2023*). Türkiye'nin deprem riski altındaki makroekonomik kırılganlığı incelendiğinde, ortaya çıkan toplam finansal yükün en baskın unsurunu konut stokundaki yapısal hasarlar oluşturmaktadır. Bu kalem, doğrudan maliyetlerin yaklaşık %54,9'unu kapsayarak 56,9 milyar dolar mertebesinde bir yük getirmekte olup sismik performans eksikliğinden kaynaklanan bu kayıpların hemen ardından gelen ikinci en önemli bileşen ise kamu altyapı sistemleri ile hizmet binalarındaki hasarlardır; bu kalem yaklaşık 12,9 milyar dolarlık bir maliyete karşılık gelmekte ve ekonomik hasar dağılımının başlıca ikinci parametresini teşkil etmektedir (*T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2023*).

Yapısal güçlendirme, depreme karşı mevcut yapıların sismik performansını artırmak amacıyla uygulanan tüm mühendislik müdahalelerini kapsar. Bu müdahaleler temel olarak üç yaklaşımla sınıflandırılır: taşıyıcı sistemin kapasitesini ve rijitliğini artırarak binanın daha yüksek yatay yüklere dayanıklı hale getirilmesi (perde ekleme, kolon mantolama, çelik çaprazlar gibi), yapının sünekliğini geliştirerek enerji sönümleme kapasitesini yükseltip kırılgan

¹ Öğretim Görevlisi, Malatya Turgut Özal Üniversitesi, ORCID: 0000-0002-1295-1909

davranışı önlemek (FRP sargı, ek etriye, yerel güçlendirmeler vb.) ve deprem talebini doğrudan azaltmak (taban izolatörleri, viskoz/sürtünmeli sönümleyiciler, kütle azaltma yöntemleri gibi). Gerçek proje uygulamalarında bu yaklaşımlar genellikle birbirini tamamlayıcı şekilde bir arada kullanılır; çünkü tek bir yöntemle hedeflenen performans seviyesine ulaşmak çoğu zaman yetersiz kalır. Amaç, yapıyı hem daha dayanıklı kılmak hem de kontrollü hasar verecek şekilde güvenli hale getirmektir (Chopra, 2012; Fardis, 2009b). Performansa dayalı deprem mühendisliği (PBEE) yaklaşımı, mevcut yapıların güçlendirme tasarımlarının güncel ve en güvenilir bilimsel temelini oluşturur. Bu yöntem, deprem tehlikesinden başlayıp yapısal talebe, hasar seviyelerine ve nihayetinde ekonomik, işlevsel veya can kaybı gibi kayıplara uzanan zincir üzerinden performansın olasılıksal olarak değerlendirilmesini sağlar. Böylece mühendis, geleneksel “güvenli/güvensiz” ikileminin ötesinde, farklı deprem şiddetlerinde gerçekçi performans seviyelerini hesaplayabilir ve güçlendirme kararlarını risk odaklı, maliyet-etkin bir zemine oturtabilir (Cornell & Krawinkler, 2003).

1.2. Tarihsel Gelişim ve Güncel Yaklaşımlar

Yapısal güçlendirme pratiği, 20. yüzyılın ortalarından itibaren sistematik bir disiplin haline gelmeye başlamıştır. Başlangıç yıllarında ağırlıklı olarak betonarme mantolama, perde eklenmesi, çelik profil takviyeleri ve enjeksiyon gibi klasik yöntemler tercih edilirken; 1990’lı yıllardan itibaren malzeme ve teknoloji alanındaki ilerlemeler, güçlendirme mühendisliğine yeni ufuklar açmıştır. Özellikle fiber takviyeli polimer (FRP) kompozit sistemleri, karbon ve cam elyafı esaslı sargı uygulamaları ile yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve korozyon direnci sayesinde hızla yaygınlaşmış; aynı dönemde viskoz, sürtünmeli ve metalik enerji sönümleyiciler ile sismik taban izolatörleri gibi pasif kontrol cihazları da pratik uygulamalara girmiştir. Bu gelişmeler, güçlendirme yaklaşımını salt taşıyıcı kapasite artırmaktan çıkarıp, yapının genel sismik davranışını (süneklik, enerji sönümleme, talep azaltma) bütüncül olarak iyileştirmeye yönelik modern bir mühendislik vizyonuna dönüştürmüştür (Bakis vd., 2002). Günümüzde yapay zeka destekli hasar tespit sistemleri, yüksek performanslı kompozit malzemeler ve modüler güçlendirme teknikleri deprem mühendisliğinin geleceğini belirleyen temel unsurlar haline gelmiştir; Türkiye’de ise bu alandaki mevzuat, 2007 Deprem Yönetmeliği ile başlayan köklü dönüşümü 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği ile zirveye taşımış, mevcut yapıların değerlendirilmesi ve güçlendirilmesine yönelik kapsamlı bir çerçeve sunarak performansa dayalı tasarım anlayışını benimsemiş ve Eurocode 8 ile ASCE 7-16 gibi uluslararası standartlarla büyük ölçüde uyumlu bir yapı ortaya koymuştur (Akansel vd., 2020).

1.3. Bölümün Amaçları ve Kapsamı

Bu kitap bölümü, betonarme ve yığma yapıların sismik güçlendirme tekniklerini üç katmanlı bir yaklaşımla incelemeyi hedeflemektedir: öğretici düzeyde teorik temeller, temel tanımlar ve terminoloji; tasarım düzeyinde uygulama prosedürleri, detaylandırma ilkeleri ve kalite denetim esasları; eleştirel düzeyde ise tekniklerin karşılaştırmalı analizi, üstünlük-zayıflık değerlendirmesi ve uygun seçim kriterleri; bu çerçevede, ulusal mevzuat olan TBDY 2018 ve TS 500 ile uluslararası standartlar (Eurocode 8, ACI 318/440, FEMA 356/440) temel alınarak, hem Türkçe hem de yurtdışı güncel akademik literatürden derlenen bulgularla desteklenmektedir.

2. TEORİK TEMELLER VE STANDART ÇERÇEVESİ

2.1. Performansa Dayalı Deprem Mühendisliği (PBEE)

Performansa dayalı deprem mühendisliği (PBEE), yapısal performansı olasılıksal ve bütüncül bir çerçevede değerlendiren çağdaş bir yaklaşım olup, Cornell ile Krawinkler tarafından 2003 yılında ortaya konan dört katmanlı zincir üzerinden işler: (1) tehlike analiziyle bölgenin sismik tehlike seviyesinin tanımlanması, (2) mühendislik talep parametreleri (EDP) aracılığıyla yapının deprem sırasında maruz kaldığı kat ötelenmesi, plastik dönme gibi yanıtların hesaplanması, (3) hasar ölçüleri (DM) ile yapısal ve yapısal olmayan bileşenlerde oluşan hasar seviyelerinin belirlenmesi ve (4) nihai kayıp tahminleri (ekonomik maliyet, can kaybı riski ve işlevsellik kaybı) şeklinde sıralanır (Krawinkler & Cornell, 2003).

$$P(Kayıp > x) = \int P(Kayıp | DM) \cdot P(DM | EDP) \cdot P(EDP | IM) \cdot \lambda(IM) dIM \quad (1)$$

2.2. Performans Seviyeleri ve Hedefleri

Güçlendirme tasarımında hedeflenen performans seviyeleri, yapının kullanım amacı, önem derecesi ve deprem sonrası beklenen işlevsellik gereksinimlerine göre belirlenir; bu bağlamda TBDY 2018, dört temel performans düzeyini tanımlamaktadır: (1) Kesintisiz Kullanım (KK) – taşıyıcı sistemde yapısal hasarın oluşmadığı ya da ihmal edilebilir düzeyde kaldığı, yapısal olmayan elemanlarda da sınırlı hasar meydana gelen durum; (2) Sınırlı Hasar (SH) – taşıyıcı sistemde doğrusal olmayan davranışın sınırlı kaldığı, onarılabilir nitelikte hafif hasarların olduğu seviye; (3) Kontrollü Hasar (KH) – can güvenliğinin sağlandığı, taşıyıcı sistemde çoğunlukla onarılabilir nitelikte kontrollü ve ağır olmayan hasarların kabul edildiği düzey; (4) Göçmenin Önlenmesi (GÖ) – ileri düzeyde ağır hasarların olduğu, ancak tam göçmenin engellendiği göçme öncesi durum. Benzer şekilde uluslararası alanda ASCE/SEI 41-23, Immediate Occupancy (IO) (hemen kullanım), Life Safety (LS) (can güvenliği) ve Collapse Prevention (CP)

(göçmenin önlenmesi) performans seviyelerini tanımlayarak, yapısal ve yapısal olmayan bileşenlerin deprem sonrası davranışını risk odaklı bir yaklaşımla ele alır.

Tablo 1. Performans Seviyeleri Karşılaştırması (TBDY 2018, ASCE/SEI 41-23, Eurocode 8-3)

Performans Seviyesi	TBDY 2018	ASCE/SEI 41-23	Eurocode 8-3	Drift(ötelenme) Limiti (%)
Kesintisiz Kullanım	KK	IO	DL	< 0.5
Sınırlı Hasar	SH	IO-LS	SD	0.5 - 1.0
Can Güvenliği	KH	LS	SD-NC	1.0 - 2.0
Göçme Öncesi	GÖ	CP	NC	2.0 - 4.0

Kaynak: TBDY (2018), ASCE/SEI 41-23 (2023), EN 1998-3:2005

2.3. Yer Değiştirme Temelli Tasarım Kriterleri

Modern güçlendirme tasarımı, 20. yüzyılın sonlarından itibaren kuvvet temelli yöntemlerden uzaklaşarak yer değiştirme temelli (deplasman odaklı) yaklaşımlara doğru belirgin bir evrim geçirmiştir (Priestley vd., 2008). Katlardaki görelî ötelenme oranı ise (inter-story drift ratio), yapısal hasarın en güçlü göstergelerinden biri olup aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$\theta = \Delta / h \quad (2)$$

Kat görelî ötelenme oranı ($\theta = \Delta / h$), yapısal sistem düzeyinde hasarın en güvenilir ve yaygın kabul gören göstergelerinden biri olup, görelî kat arası yer değiştirmenin (Δ) kat yüksekliğine (h) bölünmesiyle hesaplanır; buna ek olarak, plastik mafsallı dönmesi (θ_p) eleman bazında hasar ölçütü olarak kullanılmakta, TBDY 2018 ise kesit hasar bölgelerini beton ve donatı birim şekil değiştirme sınırlarıyla net bir biçimde tanımlayarak elemanların süneklik kapasitesinin daha gerçekçi ve tutarlı değerlendirilmesini sağlamaktadır.

3. BETONARME YAPILARIN GÜÇLENDİRME TEKNİKLERİ

Betonarme yapılardaki güçlendirmenin asıl amacı, var olan yapının deprem anında karşılaşacağı sismik etkilere karşı taşıyıcı kapasitesini, sünekliğini ve enerji yutma kabiliyetini yükseltmek yoluyla can güvenliğini sağlamak, yapının ani ve yıkıcı göçme riskini ya tamamen bertaraf etmek ya da kabul edilebilir bir düzeye çekmek ve mümkün olduğunca deprem sonrasında binanın işlevsel kalmasını (kullanılabilirliğini) korumaktır.

Betonarme yapıların depreme karşı güçlendirilmesi, mevcut kolon, kiriş, perde ve döşeme gibi taşıyıcı elemanların sismik dayanımını, sünekliğini ve enerji sönmüleme performansını artırmaya yönelik mühendislik müdahalelerinin tümünü kapsar; bu müdahaleler, yapının deprem sırasında kırılğan değil kontrollü

ve öngörülebilir bir biçimde davranmasını hedefler. Bu amaçla kullanılan yöntemler aşağıdaki başlıklarda verilmiştir.

3.1. Betonarme Mantolama

Betonarme yapı elemanlarındaki dayanım kapasitesinin artırılması amacı ile yapılan betonarme mantolama uygulamasında dikkat edilmesi gereken detaylar aşağıda sunulmuştur.

3.1.1. Teorik Temeller

Betonarme mantolama tekniği, mevcut betonarme elemanların çevresine yeni betonarme kesit eklenerek hem kesit boyutlarının büyütülmesi hem de taşıma kapasitesinin artırılması prensibine dayanır; bu yöntem, yapısal performansı esas olarak üç temel mekanizma yoluyla iyileştirir: (i) rijitlik ve moment dayanımının artırılması, (ii) kesme kapasitesinin yükseltilmesi ve (iii) yerel süneklik ile enerji sönmülme yeteneğinin geliştirilmesi (Fardis, 2009a; ACI Committee 562, 2025).

Yapısal performansın artırılması sayesinde:

- Eğilme Kapasitesi Artışı: Kesit boyutlarının ve donatı miktarının artmasıyla eğilme dayanımı yükselir.
- Kesme Kapasitesi Artışı: Enine donatı (etriye) eklenmesiyle kesme dayanımı artar.
- Sargı Etkisi: Mevcut betonun yeni betonarme manto tarafından sarılmasıyla süneklik ve basınç dayanımı artar.

Sargılı beton modeline göre, sargı basıncı (f_i) ve sargılı beton dayanımı (f'_{cc}) aşağıdaki formüllerle hesaplanır (Mander vd., 1988):

$$f'_{cc} = f'_c [2.254\sqrt{1 + 7.94 f_i/f'_c} - 2(f_i/f'_c) - 1.254] \quad (3)$$

3.1.2. Tasarım Prosedürü

Betonarme mantolama tasarımı, TBDY 2018 Bölüm 17 ve ACI 562-25 esaslarına göre aşağıdaki adımları içermektedir:

- Mevcut Durum Değerlendirmesi: Beton ve donatı dayanımları, mevcut kesit geometrisi ve donatı detayları belirlenir.
- Hedef Performans Belirleme: Güçlendirme sonrası ulaşılması gereken performans seviyesi tanımlanır.

- Manto Kalınlığı Hesabı: Minimum manto kalınlığı genellikle 75-150 mm arasında seçilir; kesme ve eğilme kapasitesi gereksinimleri hesaplanır.
- Donatı Tasarımı: Boyuna donatılar kapasite artışı için, enine donatılar ise kesme dayanımı ve sargı etkisi için boyutlandırılır.
- Ara Yüz Detaylandırması: Eski-yeni beton ara yüzünde aderans sağlamak için yüzey hazırlığı, dübel ve ankraj detayları belirlenir.

3.1.3. Uygulama Detayları

Başarılı bir betonarme mantolama uygulamasının etkinliği, büyük ölçüde uygulama sırasındaki kritik detaylara bağlıdır (Ludovico vd., 2017):

- Yüzey hazırlığı: Mevcut beton yüzeyi en az 5 mm derinliğinde pürüzlendirilmeli, gevşek agreg a parçacıkları, toz ve kir tamamen temizlenmeli; ardından yüzey iyice nemlendirilerek yeni betonun yeterli aderansı sağlanmalıdır.
- Ankraj/dübel sistemi: Mevcut elemana Ø12–16 mm çapında kimyasal veya mekanik dübellerle 200–300 mm aralıklarla düzenli ankraj yapılmalı; bu, mantolama katmanının kesme ve çekme kuvvetlerine karşı bütünleşik çalışmasını garanti eder.
- Aderans artırıcı malzeme: Epoksi esaslı veya polimer modifiyeli çimento bazlı aderans artırıcı katmanı, eski-yeni beton arayüzünde güvenilir bir geçiş bölgesi oluşturmak üzere homojen olarak uygulanmalıdır.
- Donatı detaylandırması: Boyuna donatılar düğüm bölgelerinde yeterli ankraj uzunluğu ve uygun büküm yarıçapıyla güvenli şekilde bağlanmalı; etriyeler mutlaka 135° kancalı olarak detaylandırılmalı ve bindirme uzunlukları TBDY 2018'e uygun olarak sağlanmalıdır.
- Beton yerleştirme ve sıkıştırma: Kendiliğinden yerleşen beton (KYB) kullanımı, homojen doluluk ve düşük boşluluk oranı açısından en avantajlı yöntemdir; KYB tercih edilmediği durumlarda ise ince agreg a esaslı, yüksek işlenebilirlikte beton karışımı kullanılmalı ve vibrasyon işlemi titizlikle uygulanarak segregasyon ve petekleşme önlenmelidir.

Bu adımların her biri, mantolama katmanının mevcut elemanla monolitik davranmasını ve beklenen kapasite artışı ile süneklik katkısının tam olarak gerçekleştirilmesini sağlayan temel mühendislik prensipleridir.

3.2. FRP ile Güçlendirme

Betonarme yapı elemanlarındaki dayanım kapasitesinin artırılması amacı ile yapılan FRP ile güçlendirme uygulamasında dikkat edilmesi gereken detaylar aşağıda sunulmuştur.

3.2.1. FRP Malzeme Özellikleri

Fiber takviyeli polimer (FRP) sistemleri, yüksek çekme dayanımı, düşük ağırlık ve üstün korozyon direnci sayesinde deprem güçlendirme mühendisliğinde yaygın olarak tercih edilmekte; özellikle betonarme ve yığma yapıların yerel süneklik, kesme kapasitesi ve genel sismik performansını iyileştirmede etkili bir çözüm sunmaktadır (ACI Committee 440, 2017). E, bir malzemenin aksel yük altındaki rijitliğini (eğilmeye veya uzamaya karşı direncini) temsil eder, f_u ise bir malzemenin (özellikle donatı çeliğinin) kopmadan önce taşıyabildiği maksimum gerilme değeridir ve üç ana FRP türü kullanılmaktadır:

1. CFRP (Karbon FRP): En yüksek dayanım ve rijitlik; $E = 230-640$ GPa, $f_u = 2100-5000$ MPa
2. GFRP (Cam FRP): Ekonomik seçenek; $E = 70-85$ GPa, $f_u = 1500-3000$ MPa
3. BFRP (Bazalt FRP): Çevre dostu alternatif; $E = 85-90$ GPa, $f_u = 2000-3000$ MPa

Tablo 2. FRP Malzeme Özelliklerinin Karşılaştırması

FRP Türü	E (GPa)	f_u (MPa)	ϵ_u (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Maliyet
CFRP	230-640	2100-5000	1.2-1.9	1.5-1.6	Yüksek
GFRP	70-85	1500-3000	2.0-4.0	2.1-2.5	Düşük
BFRP	85-90	2000-3000	2.5-3.0	2.6-2.8	Orta
Çelik	200	400-600	10-25	7.85	Düşük

Kaynak: ACI 440.2R-17 (2017), fib Bulletin 90 (2019)

3.2.2. FRP Tasarım İlkeleri

FRP ile güçlendirme tasarımı, ACI 440.2R-17 ve fib Bulletin 90 (*FIB Bulletin 90-Externally Applied FRP Reinforcement For Concrete Structures*, 2019) esaslarına göre yapılmaktadır. Kolon sargılamasında FRP'nin sargı basıncı (f_l) ve sargılı beton dayanımı artışı aşağıdaki formüllerle hesaplanır:

$$f_l = (2 \cdot n \cdot t_f \cdot E_f \cdot \epsilon_{fe}) / D \quad (4)$$

Burada n kat sayısı, t_f lif kalınlığı, E_f FRP elastisite modülü, ϵ_{fe} etkin birim uzama ve D kolon çapıdır. Tasarımda kritik husus, soyulma (debonding) limitinin dikkate alınmasıdır. Türkiye bina Deprem Yönetmeliği, etkin birim uzamayı kopma birim uzamasının %50'i ile sınırlamaktadır: $\epsilon_f \leq 0.50 \epsilon_{fu}$ (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, 2018).

3.2.3. Uygulama Prosedürü ve Kalite Kontrol

FRP uygulama prosedürü ana hatları ile şu adımları içermektedir (*Strengthening and Rehabilitation of Civil Infrastructures Using Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites*, 2008):

- Yüzey Hazırlığı: Betonarme elemanlar sıva artığı kalmayacak şekilde sıvadan, yabancı maddeden ve serbest haldeki malzemeden arındırılmalı, segregasyon tespit edilen gerekli bölgelere yüksek mukavemetli tamir harçları uygulanmalı ve köşeler yuvarlatılmalı (pah yapılmalı) ve yüzey temizlenmelidir.
- Astar Uygulaması: Epoksi bazlı astar malzeme uygulama yapılacak tüm yüzeye dikkatlice uygulanır.
- FRP Uygulama: Islak yatırma veya kuru yatırma yöntemiyle FRP yerleştirilir.
- Sertleşme: Ortam koşullarına bağlı olarak 7-14 gün kürleme süresi uygulanır.
- Kalite Kontrol: Aderans testi, kalınlık ölçümü ve görsel muayene yapılır.

Kalite kontrol testleri arasında pull-off testi (min. 1.4 MPa), kalınlık ölçümü (tolerans $\pm 10\%$) ve görsel muayene (hava kabarcığı, delaminasyon kontrolü) yer almaktadır.

3.3. Çelik Mantolama ve Sargılama

Çelik mantolama, beton kesitini büyütmeden dıştan bir kafes (köşebent-lama) ile sargı etkisi oluşturur ve sünekliği artırır. Bu yöntem özellikle mimari kısıtların olduğu durumlarda tercih edilmektedir (Fardis, 2009a). Çelik mantolama sistemleri üç ana tipte uygulanmaktadır:

1. Köşebent - Lama Sistemi: L- profiller köşelere, yatay lamalar aralara yerleştirilir.
2. Çelik Kafes Sistemi: Tam çevreleyen çelik kafes oluşturulur.
3. Çelik Levha Sargı: İnce çelik levhalarla kolon sarılır.

Tasarımda sargı basıncı, çelik kesit alanı ve aralığına bağlı olarak hesaplanır. Kritik hususlar arasında korozyon koruması (epoksi kaplama, galvaniz), yangın dayanımı (yangın yalıtımı) ve bağlantı detayları (epoksi dolgu, ankraj cıvatası) yer almaktadır.

3.4. Betonarme Perde İlavesi

Perde ilavesi, mevcut yapıya yeni betonarme perdeler eklenerek yapının yanal rijitliğinin artırılması ve deprem yüklerinin büyük bölümünün bu perdeler tarafından taşınması ilkesine dayanmaktadır. Bu yöntem, özellikle yumuşak kat düzensizliği riski olan yapılarda etkili bir çözüm sunmaktadır (Kappos & Antoniadis, 2007).

Perde ilavesinin yapısal etkileri şunlardır:

- Periyot Azalması: Rijitlik artışı ($k\uparrow$) ile doğal periyot düşer:

$$T = 2\pi\sqrt{m/k} \quad (5)$$

- Drift (ötelenme) Azalması: Yanal ötelenme oranları önemli ölçüde azalır.
- Mekanizma Değişimi: Plastikleşme zayıf kolonlardan lelemanlardan perde elemanlara doğru kayar.
- Taban Kesme Artışı: Rijitlik artışı spektral ivmeyi artırabilir; temel tasarımı kontrol edilmelidir.

Tasarımda dikkat edilmesi gereken hususlar: simetrik yerleşim (burulma düzensizliğinden kaçınma), temel kapasitesi kontrolü, mevcut sisteme güvenli bağlantı ve devrilme momentinin karşılanmasıdır.

4. YIĞMA YAPILARIN GÜÇLENDİRME TEKNİKLERİ

4.1. Yığma Yapıların Mekanik Davranışı

Yığma yapılar, basınçta dayanıklı ancak çekmede zayıf ve çoğunlukla gevrek davranışlı sistemlerdir. Deprem etkisi altında iki temel hasar mekanizması gözlemlenmektedir (Tomazeciv, 1999); (Magenes & Calvi, 1997):

1. Düzlem İçi Kesme: Yatay deprem kuvvetleri altında duvarda diyagonal çatlaklar oluşur. Kesme dayanımı, Mohr-Coulomb kriterine göre hesaplanır:

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \sigma_n \quad (6)$$

Burada; τ_0 kohezyon, μ sürtünme katsayısı ve σ_n normal gerilmedir.

2. Düzlem Dışı Devrilme: Duvarın düzlemine dik yönde etkiyen kuvvetler nedeniyle rijit blok devrilmesi meydana gelir. Bu durum ani yıkılmalara sebep olabileceği için tehlikelidir; bağ elemanları (tie-rods) ve diyafram ankrajları ile önlenabilir.

4.2. TRM/FRCM Sistemleri

Tekstil donatılı harç (TRM) veya fiber takviyeli çimentolu matris (FRCM) sistemleri, FRP'ye alternatif olarak yığma güçlendirmede kullanılmaktadır. Bu sistemler tekstil donatı (cam, karbon, bazalt) ve inorganik matris (çimento veya kireç bazlı harç) kombinasyonundan oluşmaktadır (D'Ambrisi vd., 2013).

TRM/FRCM'nin FRP'ye göre avantajları:

- Buhar geçirgenliği (tarihî yapılar için kritik bir zorunluluk)
- Yangın dayanımı (inorganik matris)
- Alkalin ortam uyumluluğu

Düşük maliyet (cam tekstil kullanımında)

Tasarım prosedürü ACI 549.4R-20 ve fib Bulletin 90 esaslarına göre yapılmaktadır. Kesme kapasitesi artışı şu formülle hesaplanır (ACI 549.4R-20, 2020):

$$\Delta V_f = 0.5 \cdot n \cdot t_f \cdot b_f \cdot E_f \cdot \epsilon_{fe} \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha) \quad (7)$$

4.3. Enjeksiyon Teknikleri

Yığma yapılarda enjeksiyon, çatlakların ve boşlukların doldurulması amacıyla uygulanan bir onarım/güçlendirme tekniğidir. Enjeksiyon malzemeleri üç ana kategoride sınıflandırılmaktadır (Roca vd., 2010):

1. Çimento Bazlı Enjeksiyon: Yüksek dayanım, düşük maliyet sebebi ile yoğun olarak tercih edilmektedir; ancak büzülme ve yapısal unsurlar arasında bağlantı problemi(uyumsuzluk) riski gözlemlenebilir.

2. Kireç Bazlı Enjeksiyon: Tarihî yapılarla uyumlu, buhar geçirgen; ancak düşük ve erken dayanım düzeylerine ulaşılması riskleri oluşabilir.

3. Epoksi/Polimer Enjeksiyon: Yüksek aderans, ince çatlaklara nüfuz; ancak buhar geçirgenlik sorunları görülebilmektedir.

Enjeksiyon prosedürü şu şekilde özetlenebilir: Çatlak haritalama, Yüzey temizliği, Enjeksiyon pakeleri (portları) yerleştirme, Düşük basınçla enjeksiyon (0.5-2 bar), Kürleme ve port sökümü.

4.4. Diyafram İyileştirmesi ve Kutu Davranışı

Yığma yapılarda güvenli deprem davranışı için kutu davranışı esastır. Duvarların birlikte çalışması ve yükün tüm duvarlara dağıtılması, rijit diyafram ve güvenli duvar-döşeme bağlantıları ile sağlanmaktadır (Magenes & Calvi, 1998).

Diyafram iyileştirme yöntemleri:

1. Ahşap Döşemelerde:

- Çapraz ahşap kaplama eklenmesi
- Çelik levha/ağ eklenmesi
- Kompozit döşeme (beton topping) oluşturulması
- Duvar-döşeme ankraj detayları

2. Betonarme Döşemelerde:

- Döşeme kalınlaştırılması
- Çelik/FRP güçlendirme
- Kenar kirişleri (tie beams) eklenmesi

3. Bağ Elemanları:

- Çelik çubuklar (tie-rods)
- Köşe bağlantı plakaları
- Çevreleyen kuşak kirişleri

5. GÜÇLENDİRME TEKNİKLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI DEĞERLENDİRMESİ

Betonarme yapı elemanlarının güçlendirilmesinde kullanılan tekniklerin birbirleri ile teknik özellik mukayeseleri Tablo.3 te verilmiştir.

5.1. Betonarme Güçlendirme Tekniklerinin Karşılaştırması

Betonarme yapı elemanlarının güçlendirilmesinde kullanılan tekniklerin birbirleri ile teknik özellik mukayeseleri Tablo.3 te verilmiştir.

Tablo 3. Betonarme Güçlendirme Tekniklerinin Karşılaştırmalı Analizi

Kriter	RC Mantolama	FRP Sargı	Çelik Mantolama	Perde İlavesi
Kapasite Artışı	Çok Yüksek	Orta-Yüksek	Yüksek	Çok Yüksek
Süneklik İyileşmesi	Yüksek	Çok Yüksek	Yüksek	Yüksek
Uygulama Hızı	Yavaş	Hızlı	Orta	Yavaş
Maliyet	Düşük-Orta	Yüksek	Orta	Yüksek
Alan Kaybı	Yüksek	Minimal	Düşük	Orta
Temel Müdahalesi	Gerekli olabilir	Gerekmez	Gerekli olabilir	Gereklidir
Yangın Dayanımı	İyi	Zayıf	Orta	İyi
Bakım Gereklinimi	Düşük	Orta	Yüksek	Düşük

Kaynak: Fardis (2009), Di Ludovico ve diğerleri (2017), ACI 562-25 (2025)

5.2. Yığma Güçlendirme Tekniklerinin Karşılaştırması

Yığma yapı elemanlarının güçlendirilmesinde kullanılan tekniklerin birbirleri ile teknik özellik mukayeseleri Tablo.4 te verilmiştir.

Tablo 4. Yığma Güçlendirme Tekniklerinin Karşılaştırmalı Analizi

Kriter	TRM/FRCM	FRP	Enjeksiyon	Çelik Bağlantı
Kesme Kapasitesi	Yüksek	Çok Yüksek	Orta	Düşük
Düzlem Dışı Stab.	Yüksek	Yüksek	Düşük	Çok Yüksek
Buhar Geçirgenlik	İyi	Zayıf	Orta	İyi
Tarihî Yapı Uyum	İyi	Orta	Çok İyi	Orta
Maliyet	Orta	Yüksek	Düşük	Düşük
Uygulama Zorluğu	Orta	Düşük	Yüksek	Düşük
Dayanıklılık	İyi	Orta	İyi	Çok İyi

Kaynak: Tomažević (1999), Roca ve diğerleri (2010), D'Ambrisi ve diğerleri (2013)

5.3. Güçlendirme Tekniği Seçim Kriterleri

Güçlendirme tekniği seçimi, çok kriterli bir karar verme sürecidir. Mühendislik vizyonu ile fiyat/performans hesaplamaları yapılmalı, yapıdan sağlanacak fayda çerçevesinde aşağıdaki faktörler değerlendirilmelidir:

1. Yapısal Faktörler: Mevcut hasar türü ve seviyesinin tespiti, hedeflenen performans seviyesinin belirlenmesi, yapısal sistem özelliklerinin değerlendirilmesi, temel kapasitesinin hesaplanması gerekmektedir.

2. Mimari ve İşlevsel Faktörler: Kullanılan alan kısıtlarının değerlendirilmesi, cephe korunması gerekliliği ve ihtiyacı, kullanım kesintisi toleransının bulunup bulunmaması, yapıdaki estetik gereksinimler ve estetik kaygıların neler olacağı tespit edilmelidir.

3. Ekonomik Faktörler: ilk yatırım maliyeti, yaşam döngüsü maliyeti, uygulama süresi, bakım gereksinimlerin belirlenmesi gerekmektedir.

4. Çevresel ve Sosyal Faktörler: karbon ayak izi, atık üretimi, gürültü ve toz. tarihi değer korunmasına dair değerlendirmelerin yapılması gerekmektedir.

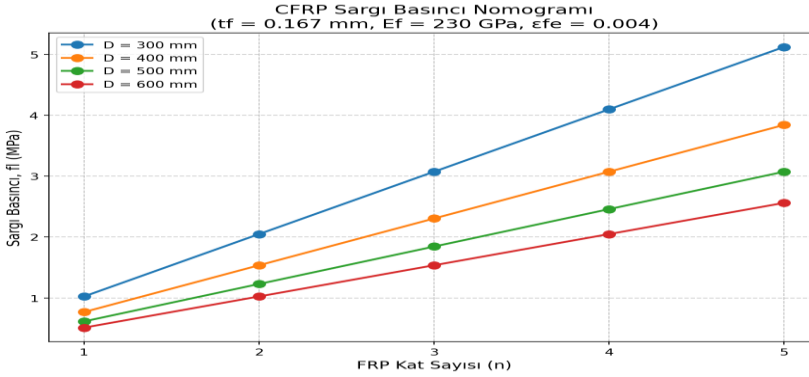
6. TASARIM NOMOGRAMLARI VE HESAP ARAÇLARI

CFRP (karbon fiber takviyeli polimer) sargı uygulandığında betonarme kolonlara sağlanan yanal (lateral) sargı basıncının hesaplanması gerekmektedir. Bu amaçla hazırlanmış olan tasarım nomogramları aşağıda sunulmuştur.

6.1. FRP Sargı Tasarım Nomogramı

Şekil 1 de verilmiş olan nomogram: dairesel beton kolon çapı ve CFRP katman sayısına bağlı olarak FRP sargısının oluşturduğu yanal sıkıştırma basıncını (confinement pressure) hızlıca okumaya/hesaplamaya yarayan

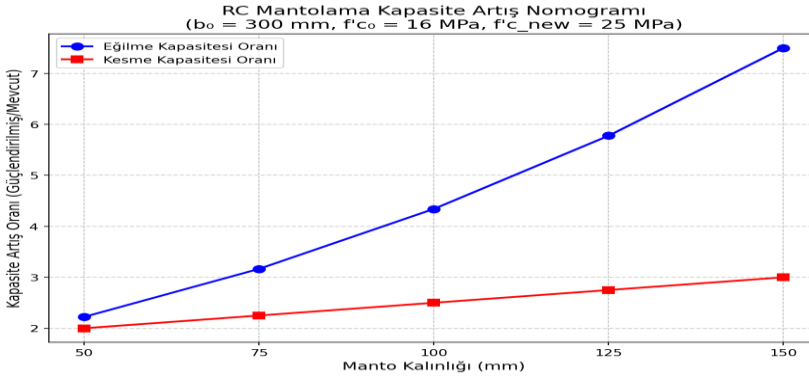
yardımcı bir grafik olup, güçlendirme tasarımında kolonun basınç dayanımı ve sünekliliğini ne kadar iyileştireceğini tahmin etmede kullanılır.



Şekil 1. CFRP Sargı Basıncı Tasarım Nomogramı (ACI 440.2R-17 esaslarına göre)

6.2. Mantolama Kalınlığı Tasarım Nomogramı

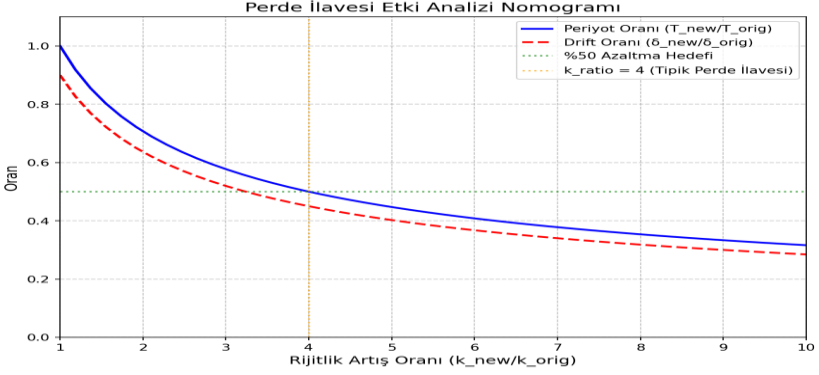
Şekil 2 ile sunulmuş olan nomogram: betonarme kolonlara uygulanan betonarme mantolama (jaket/manto) kalınlığına bağlı olarak taşıyıcı kapasitedeki artış oranını hızlıca göstermeye yarar.



Şekil 2. Betonarme Mantolama Kapasite Artış Nomogramı (TBDY 2018 esaslarına göre)

6.3. Perde İlavesi Etki Analizi Nomogramı

Şekil 3 te sunulmuş olan nomogram: betonarme bir binaya yeni perde eklenmesi durumunda yapının genel rijitliğindeki artışın (k_{new} / k_{orig}) deprem davranışına olan etkisini hızlıca gösteren yardımcı bir grafik.



Şekil 3. Perde İlavesi Periyot ve Drift Azaltma Nomogramı

7. ULUSAL VE ULUSLARARASI STANDARTLAR

7.1. Standart Çerçevesi Karşılaştırması

Güçlendirme tasarımında kullanılan başlıca ulusal ve uluslararası standartlar şunlardır:

Türk Standartları:

- TBDY 2018: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği - Bölüm 15 (Mevcut Yapılar)
- TS 500: Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları
- TS EN 1504 Serisi: Beton Onarım ve Koruma

TS EN 1504 serisi toplam 10 kısım dan oluşur (*TSE*) :

- **TS EN 1504-1:** Tanımlar (Definitions) – Onarım süreçlerinde kullanılan temel terminolojiyi ve kavramsal çerçeveyi belirleyen genel tanımlar kılavuzudur.
- **TS EN 1504-2:** Yüzey koruma sistemleri (Surface protection systems for concrete) – Betonun çevresel etkilere karşı direncini artırmak amacıyla kullanılan kaplama, emprenye ve hidrofobik bariyer sistemlerinin performans kriterlerini kapsar.
- **TS EN 1504-3:** Yapısal ve yapısal olmayan tamir (Structural and non-structural repair) – Matris bütünlüğünü sağlamak için kullanılan harçları mekanik özelliklerine göre R1-R4 sınıflarında kategorize eder; özellikle R3 ve R4 sınıfları yapısal kapasitenin geri kazanılmasında kritik rol oynar.
- **TS EN 1504-4:** Yapısal yapıştırma (Structural bonding) – Kompozit plakaların (FRP vb.) veya çelik elemanların mevcut betona yüksek mukavemetli yapıştırıcılarla entegre edilmesine yönelik teknik şartları belirler.

- **TS EN 1504-5:** Beton enjeksiyonu (Concrete injection) – Yapıdaki çatlakların karakteristik genişliğine göre seçilen epoksi, poliüretan veya çimento esaslı dolgu tekniklerini standardize eder.
- **TS EN 1504-6:** Donatı çeliği ankrajı (Anchoring of reinforcing steel bar) – Yeni donatıların mevcut yapı elemanlarına güvenli şekilde ankrajlanmasında kullanılan kimyasal reçinelerin ve sistemlerin aderans karakteristiklerini tanımlar.
- **TS EN 1504-7:** Donatı korozyon koruması (Reinforcement corrosion protection) – Donatı çeliğinin oksidasyonunu engellemek amacıyla uygulanan aktif veya pasif bariyer kaplamalarının koruma performansını esas alır.
- **TS EN 1504-8:** Kalite kontrolü ve uygunluk değerlendirmesi (Quality control and certification of conformity) – Ürünlerin fabrika üretim kontrol süreçlerini, CE markalama prosedürlerini ve kalite güvence kriterlerini düzenler.
- **TS EN 1504-9:** Ürün ve sistemlerin genel kullanım prensipleri (General principles for the use of products and systems) – Onarım stratejilerinin belirlenmesinde 11 temel prensip (P1-P11) sunan, mühendislik karar mekanizmasının merkezinde yer alan teknik tasarım rehberidir.
- **TS EN 1504-10:** Şantiye uygulaması ve iş kalite kontrolü (Site application of products and quality control of the works) – Ürünlerin şantiye ortamındaki uygulama kalitesini, saha testlerini ve nihai işçilik standartlarını denetleyen uygulama protokolüdür.

Amerikan Standartları ise:

•(ASCE/SEI 41-23, 2023): Mevcut binaların sismik performans seviyelerini belirleyerek hedeflenen güvenlik düzeyine ulaştırılması için gerekli güçlendirme metodolojilerini tanımlayan temel referanstır.

•(ACI -318-19(22), 2022): Betonarme sistemlerin yapısal tasarım ilkelerini, malzeme karakteristiklerini ve detaylandırma kurallarını belirleyen dünya genelinde geçerli ana şartnamedir.

• (ACI Committee 440, 2017): Lifli polimer (FRP) kompozitlerin yapısal eleman kapasitelerini artırmada kullanımına yönelik tasarım limitlerini ve uygulama kriterlerini belirleyen teknik kılavuzdur.

•(ACI Committee 562, 2025): Mevcut betonarme yapıların yapısal ömrünü uzatmak amacıyla değerlendirme, onarım ve rehabilitasyon süreçlerini bütüncül bir yaklaşımla disipline eden standarttır.

- (FEMA 356, 2000)/(FEMA 440, 2005): Yapısal sismik rehabilitasyon için performans esaslı analiz yöntemlerini ve doğrusal olmayan davranış modellerini literatüre kazandıran öncü dokümanlardır.

Avrupa Standartları:

- (EN 1998-3: Eurocode 8, 2005) Avrupa normları çerçevesinde mevcut yapıların sismik risk analizlerini ve güçlendirme stratejilerini yapısal güvenlik kriterleri ışığında düzenleyen temel koddur.

- TS EN 1504 Serisi (TSE): Betonarme yapıların korunması, onarımı ve güçlendirilmesinde kullanılacak ürünlerin performans kriterlerini ve uygulama prensiplerini belirleyen ulusal ve uluslararası standartlar dizisidir.

- (Fib Model Code 2010, 2012) Betonarme tasarım ve onarım felsefesine dair en güncel bilimsel teorileri ve malzeme modellerini sentezleyen vizyoner bir model koddur.

Tablo 5 : betonarme yapıların depreme karşı değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi konusunda Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) ile uluslararası iki önemli standart olan ASCE/SEI 41-23 (ABD) ve Eurocode 8-3 (Avrupa) arasındaki temel kriterleri (analiz yöntemi, bilgi düzeyi, performans seviyeleri, malzeme dayanımı tanımları ve FRP uygulamaları) karşılaştırmalı olarak özetlemekte ve mühendislere ulusal ile uluslararası yaklaşımlar arasındaki benzerlikleri/farklılıkları hızlıca görme imkânı sağlamaktadır.

Tablo 5. Ulusal ve Uluslararası Standartların Karşılaştırması

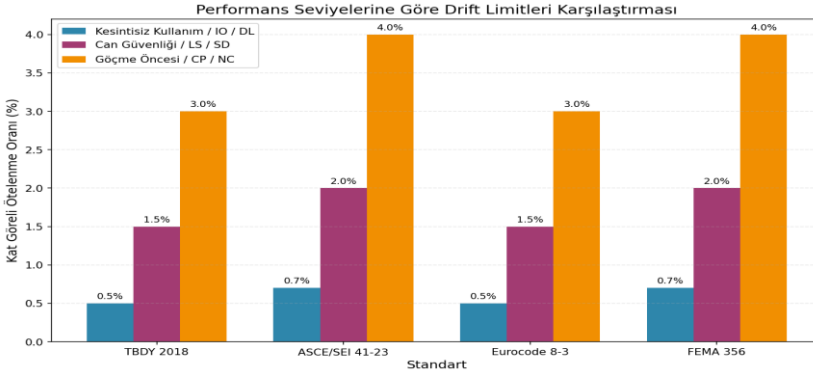
Kriter	TBDY 2018	ASCE/SEI 41-23	Eurocode 8-3
Analiz Yöntemi	Doğrusal/Doğrusal Olmayan	3 Kademeli Değerlendirme	q-faktörü/Doğrusal Olmayan
Bilgi Düzeyi	3 seviye (BD1-BD3)	3 seviye (Minimum-Comprehensive)	3 seviye (KL1-KL3)
Performans Seviyesi	KK, SH, KH, GÖ	IO, LS, CP	DL, SD, NC
Malzeme Dayanımı	Karakteristik/Ortalama	Beklenen/Alt Sınır	Karakteristik/Ortalama
FRP Tasarımı	ACI 440 referanslı	ACI 440.2R entegre	fib Bulletin referanslı

Kaynak: TBDY (2018), ASCE/SEI 41-23 (2023), EN 1998-3:2005

7.2. Drift(Ötelenme) Limitleri Karşılaştırması

Şekil 4 te sunulmuş olan grafik ile: farklı deprem yönetmeliklerinde (TBDY 2018, ASCE/SEI 41-23, Eurocode 8-3 ve FEMA 356) tanımlı performans seviyelerine göre kabul edilebilir maksimum kat arası ötelenme (drift) limitlerinin karşılaştırmasını gösterir; böylece ulusal ve uluslararası standartlar

arasındaki drift tolerans farklarını ve her performans seviyesinin ne kadar esneklik sağladığını görselleştirir.



Şekil 4. Ulusal ve Uluslararası Standartlarda Drift Limitleri Karşılaştırması

8. UYGULAMA KALİTESİ VE PERFORMANS DOĞRULAMASI

8.1. Kalite Kontrol Prosedürleri

Güçlendirme uygulamalarında kalite kontrol, projenin başarısı için kritik öneme sahiptir. Kalite kontrol prosedürleri aşağıdaki aşamaları içermektedir (ACI Committee 562, 2025):

Tablo 6. Kalite Kontrol Prosedür Tablosu

Aşama	Aşama	Parametreler ve Kriterler
1. Malzeme Kabul Testleri	Beton	Slump (kıvam) testi, 7 ve 28 günlük küp/silindirik basınç dayanımı.
	Çelik Donatı	Çekme testi (akma/çekme dayanımı), kimyasal kompozisyon analizi.
	FRP (Lifli Polimer)	Çekme dayanımı, elastisite modülü, reçine içeriği analizi.
	Epoksi / Reçine	Jel süresi, viskozite ölçümü, alt tabaka ile bağ dayanımı.
2. Uygulama Denetimleri	Yüzey Hazırlığı	Yüzey pürüzlülüğü, nem kontrolü, toz ve yağdan arındırma.
	Donatı	Donatı paspayı ve yerleşim kontrolü
	Beton	beton döküm ve kürleme takibi.
	FRP Uygulaması	Hava kabarcığı kontrolü, delaminasyon (tabakalaşma) denetimi.
3. Tamamlanmış İş Testleri	Aderans (Pull-off)	FRP: Min. 1.4 MPa; TRM: Min. 1.0 MPa (veya beton kopması).
	Ankraj Testleri	Kimyasal/mekanik ankraj çekme (tahribatlı veya tahribatsız) testi.

	Karot Testi	Mantolama için karot testi
	Yapısal Kontrol	Genel görsel muayene ve dokümantasyon: As-Built projeler vb.

8.2. Güçlendirme Sonrası Analitik Doğrulama

Güçlendirme tamamlandıktan sonra analitik doğrulama yapılmalı ve bu süreç aşağıda belirtilen hususlara dair mühendislik çözümlerini de bünyesinde barındırmalıdır:

1. Model Güncelleme: Güçlendirilmiş yapının yeni teknik analiz özelliklerini (rijitlik, kütle, kapasite) modele yansıtılır.
2. Periyot Kontrolü: Sayısal verilerle hesaplanan ve ölçülen periyotlar karşılaştırılır
3. Drift(ötelenme) Kontrolü: Yapı için istenilen hedef performans seviyesine ait drift(ötelenme) limitleri kontrol edilir.
4. Plastikleşme Dağılımı: Plastik mafsalların konumu ve dönme eğilimleri incelenir.
5. Kesme Güvenliği: Tüm elemanların kesme kapasiteleri değerlendirilir ve kontrol edilir
6. Mekanizma Kontrolü: Güçlendirme sonrası olası göçme mekanizması senaryoları değerlendirilir.

Doğrulama analizleri, pushover analizi ve/veya doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizi ile yapılmalıdır.

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, betonarme ve yığma taşıyıcı sistemlerin sismik performansını artırmaya yönelik güçlendirme metodolojilerini bütüncül bir mühendislik perspektifiyle irdlemiştir. Yapılan analizler ve teknik değerlendirmeler sonucunda ulaşılan temel çıkarımlar ve uygulama önerileri aşağıda sunulmaktadır:

Betonarme Yapılar İçin Sonuçlar:

1. **Metot Seçimi:** Güçlendirme stratejisi; yapının mevcut hasar düzeyi, hedeflenen performans hedefi ve uygulama imkanları sentezlenerek belirlenmelidir.
2. **Betonarme Mantolama:** Kesit kapasitesini artırmada oldukça etkili bir yöntem olan mantolama uygulamalarında, temel sistemine gelecek ek yükler ve kesit büyümesi titizlikle analiz edilmelidir.

3. FRP Kompozit Sistemler: Hızlı imalat ve minimum mimari müdahale avantajı sunan FRP uygulamalarında, yangın yalıtımı ve donatının betondan sıyrılma (debonding) riskleri tasarımın ana parametresi olmalıdır.

4. Perde Duvar İlavesi: Yumuşak kat düzensizliği bulunan sistemlerde rijitlik merkezi dengelenerek, simetrik bir perde yerleşimiyle burulma etkileri minimize edilmelidir.

Yığma Yapılar İçin Sonuçlar:

1. Yapısal Bütünlük: Yığma sistemlerin rehabilitasyonunda öncelik, elemanların düzlem dışı stabilitesini korumak ve yapının "kutu davranışı" sergilemesini sağlamak olmalıdır.

2. TRM/FRCM Uygulamaları: Tekstil donatılı harç sistemleri, yüksek buhar geçirgenliği ve termal dayanımı sayesinde özellikle tarihi dokuya sahip yapılarda FRP sistemlerine güçlü bir alternatif oluşturmaktadır.

3. Enjeksiyon Teknikleri: Sürekliliğini kaybetmiş duvarlarda, malzeme uyumu gözetilerek yapılan enjeksiyon işlemleriyle yapısal boşluklar giderilmeli ve kesit dayanımı restore edilmelidir.

Genel Öneriler:

1. Güçlendirme tasarımı, performansa dayalı yaklaşımla yapılmalı; hedef performans seviyesi açıkça tanımlanmalıdır.

2. Kalite kontrol prosedürleri titizlikle uygulanmalı; uygulama sonrası analitik doğrulama yapılmalıdır.

3. Belirsizliklerin etkisi duyarlılık analizleri ile değerlendirilmeli; muhafazakâr varsayımlar kullanılmalıdır.

4. Güçlendirme, yeniden yapımdan genellikle daha düşük karbon ayak izi ve kesinti süresi sunmaktadır; sürdürülebilirlik perspektifi karar verme sürecine dahil edilmelidir.

KAYNAKÇA

1. *ACI -318-19(22)*. (2022). [Yapısal Beton İçin Yapı Kodu Gereksinimleri ve Yorumu]. American Concrete Institute.
https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=318U19&Language=English&Units=US_Units
2. *ACI 549.4R-20*. (2020). American Concrete Institute.
3. ACI Committee 440. (2017). *440.2R-17: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. American Concrete Institute.
<https://doi.org/10.14359/51700867>
4. ACI Committee 562. (2025). *ACI CODE-562-25: Assessment, Repair, and Rehabilitation of Existing Concrete Structures—Code Requirements and Commentary*.
https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=562U25&Language=English&Units=US_Units
5. *AFAD Kahramanmaraş Depremi Raporu 02.06.2023*. (t.y.). Geliş tarihi 26 Şubat 2026, gönderen
https://deprem.afad.gov.tr/assets/pdf/Kahramanmara%C5%9F%20Depremi%20%20Raporu_02.06.2023.pdf
6. Akansel, V. H., Soysal, F., Kadaş, K., & Gülkan, P. (2020). Spektrum Şiddeti Perspektifinden 2018 Türkiye Deprem Tehlike Haritası Değerlendirmesi. *Türk Deprem Araştırma Dergisi*, 2(2), 115-137.
<https://doi.org/10.46464/tdad.737433>
7. ASCE/SEI 41-23. (2023). ASCE/SEI 41-23. *American Society of Civil Engineers*. <https://sp360.asce.org/personifyebusiness/Merchandise/Product-Details/productId/309658028>
8. Bakis, C. E., Bank, L. C., Brown, V. L., Cosenza, E., Davalos, J. F., Lesko, J. J., Machida, A., Rizkalla, S. H., & Triantafillou, T. C. (2002). Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction—State-of-the-Art Review. *Journal of Composites for Construction*, 6(2), 73-87.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2002\)6:2\(73\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:2(73))
9. Chopra, A. K. (2012). *Dynamics of Structures*. Pearson Education.
10. Cornell, C. A., & Krawinkler, H. (2003). *Seismic performance assessment in performance-based earthquake engineering. IUTAM Symposium on Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 27-44.
11. D'Ambrisi, A., Feo, L., & Focacci, F. (2013). Experimental and analytical investigation on bond between Carbon-FRCM materials and masonry.

- Composites Part B: Engineering*, 46, 15-20.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.10.018>
12. EN 1998-3: Eurocode 8. (2005). <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/en.1998.3.2005.pdf>
 13. Fardis, M. N. (2009a). *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*. <https://link.springer.com/series/6011>
 14. Fardis, M. N. (2009b). *Seismic Design, Assessment and Retrofitting of Concrete Buildings* (C. 8). Springer Netherlands.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9842-0>
 15. FEMA 356. (2000). *FEMA 356*. <https://www.nehrp.gov/pdf/fema356.pdf>
 16. FEMA 440. (2005). *FEMA 440 Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*.
 17. *FIB Bulletin 90-Externally Applied FRP Reinforcement For Concrete Structures*. (2019). Scribd.
<https://www.scribd.com/document/931763920/FIB-Bulletin-90-Externally-Applied-FRP-Reinforcement-for-Concrete-Structures>
 18. *Fib Model Code 2010*. (2012). 65.
<https://doi.org/doi.org/10.35789/fib.BULL.0065>
 19. Kappos, A. J., & Antoniadis, P. (2007). A contribution to seismic shear design of R/C walls in dual structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 5(3), 443-466. <https://doi.org/10.1007/s10518-007-9041-6>
 20. Krawinkler, H., & Cornell, C. A. (2003). *A Framework for Performance-based Earthquake Engineering*.
<https://www.nzsee.org.nz/db/2003/View/Paper140s.pdf>
 21. Ludovico, M. D., Prota, A., & Moroni, C. (2017). Bulletin of Earthquake Engineering. *SpringerLink*, 693-729.
 22. Magenes, G., & Calvi, G. (1997). *IN-PLANE SEISMIC RESPONSE OF BRICK MASONRY WALLS*.
https://www.academia.edu/38587598/IN_PLANE_SEISMIC_RESPONSE_OF_BRICK_MASONRY_WALLS
 23. Magenes, G., & Calvi, G. (1998). *In-plane seismic response of brick masonry walls*.
[https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199711\)26:11%3C1091::AID-EQE693%3E3.0.CO;2-6](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/(SICI)1096-9845(199711)26:11%3C1091::AID-EQE693%3E3.0.CO;2-6)
 24. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., & Park, R. (1988). Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering*,

- 114(8), 1804-1826. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1988\)114:8\(1804\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804))
25. Paulay, T., & Priestley, M. (1992). *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. Wiley. <https://www.wiley.com/en-se/Seismic+Design+of+Reinforced+Concrete+and+Masonry+Buildings-p-9780471549154>
26. Priestley, M., Calvi, G., Kowalsky, M., & Powell, G. (2008). Displacement-Based Seismic Design of Structures. *Earthquake Spectra - EARTHQ SPECTRA*, 24. <https://doi.org/10.1193/1.2932170>
27. Roca, P., Cervera, M., Gariup, G., & Pelà, L. (2010). Structural Analysis of Masonry Historical Constructions. Classical and Advanced Approaches. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 17(3), 299-325. <https://doi.org/10.1007/s11831-010-9046-1>
28. *Strengthening and Rehabilitation of Civil Infrastructures Using Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites*. (2008). <https://shop.elsevier.com/books/strengthening-and-rehabilitation-of-civil-infrastructures-using-fibre-reinforced-polymer-frp-composites/hollaway/978-1-84569-448-7>
29. T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. (2023).
30. Tomazeciv, M. (1999). *Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings | Series on Innovation in Structures and Construction (C. 1)*. <https://www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/p055>
31. TSE. (t.y.). Türk Standardları Enstitüsü. Geliş tarihi 26 Şubat 2026, gönderen <https://www.tse.org.tr/>
32. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018*. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2-1.pdf>



BÖLÜM 5

Işkın Otu Özütünde Toplam Fenolik Madde Analizi

Tuğba Başaran¹ & Tijen Ennil Bektaş² & Sezer Yiğit³

GİRİŞ

Doğal ürünlerin değerinin gün geçtikçe artması, tıbbi ve aromatik bitkilerin öneminin ve tedavilerde kullanımının da aynı oranda arttığını göstermektedir. Artan nüfus ile birlikte sağlık harcamalarının artması ve kimyasal katkıların bulunduğu sentetik ürünlerin insan sağlığı için zararlarının görülmesi doğal ürünlere oluşan talebin artmasına neden olmaktadır. Tıbbi ve aromatik bitkiler başta ilaç sanayi olmak üzere kozmetik (şampuan, sabun, parfüm, ağız bakım ürünleri, vb.), temizlik materyalleri ve gıda (sakız, şeker, çay) gibi sanayi kollarının ana bileşenini oluşturmaktadır. Tıbbi bitkiler; modern ilaçlar, geleneksel ilaçlar, nutrasötikler, gıda katkıları, sentetik ilaçların kimyasal birimleri ve farmakolojik ara ürünlerin zengin biyolojik kaynaklarıdır.

Ülkemizin coğrafı konumu, iklim ve bitki çeşitliliği, tarımsal potansiyeli, geniş yüzölçümü gibi özellikleri sayesinde tıbbi ve aromatik bitkiler alanında büyük bir çalışma potansiyeline sahip olduğu görülmektedir. Bu potansiyelin Ar-Ge çalışmalarının ışığında sağlık, gıda, kozmetik başta olmak üzere pek çok katma değeri yüksek sektöre kazandırabileceği düşünülmektedir. Tıbbi ve aromatik bitkiler hastalıklar olmadan önlem almak, tedavi etmek, yaşam kalitesini arttırmak ve bağışıklığı güçlendirmek için ilaç olarak kullanılmaktadır (Cimanga vd., 2002).

Bitkiler kozmetik, gıda, gıda ve ilaç endüstrisinde kullanılan, antioksidan ve antimikrobiyal etkiye sahip olan birçok biyoaktif bileşen (flavonoid, polifenol, tanen, pigment, enzim, mineral vb.) içermektedir (Madhuri ve Pandey, 2009). Bitkilerin tıp açısından önemi bu biyoaktif bileşenlerin ilaca dönüşebilme yeteneğine bağlıdır. Dünyada insan sağlığının korunması ya da tedavi amacıyla reçete edilen ilaçların yaklaşık % 25'i bitkilerden elde edilmektedir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) verilerine göre gerekli olan ve temel kabul edilen 252 ilaçtan % 11'i bitkisel kökenlidir (Veeresham, 2012). Bitkilerde bulunan aktif bileşikler fitokimyasallar olarak tanımlanır ve bunlara sekonder metabolitler denilmektedir.

¹ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0001-9180-3623

² Prof. Dr., Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0003-3612-5019

³ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0009-0009-2756-1370

Fenolik bileşiklerden olan flavonoidler sekonder metabolitlerin önemli bir grubunu oluşturmaktadır.

Kimyasal yolla sentezlenen ilaçların yan etkilerinin çok olması ve antibiyotiklere karşı oluşan direnç bitkisel bileşenlerin öneminin arttırmakta olup bu alanda daha fazla araştırma yapılmasına neden olmaktadır. Bu nedenle bitki ekstraktlarının antimikrobiyal olarak da kullanımı üzerine çalışmalar yapılmakta ve kullanımının sağlanması amaçlanmaktadır (Hsieh vd., 2001).

Işkın, genellikle Mayıs ayında çiçek açar. Kuzukulağıgiller (Polygonaceae) ailesine ait olan, çok yıllık bir bitkidir (Şekil 1). Boyu 1,5 metreye kadar ulaşabilmektedir. Bu bitkinin türleri arasında İngiliz ravendi (*Rheum rhabarbarum*), ravent (*Rheum rhabarbarum*) ve ülkemizde yetişen Işkın (*Rheum Ribes*) bulunmaktadır. Halk arasında uşkun, eşgın, dağ muzusu veya yayla muzusu gibi farklı adlarla da anılan Işkın, ülkemizde doğal olarak yetişen bir bitki olarak bilinir. Genellikle *Rheum Ribes* türü, Türkiye'de rastlanan tek yabani türdür. Bu bitki, çeşitli adlarla anılmasına rağmen genellikle halk arasında uşkun olarak tanınır. Işkın, özellikle yöresel mutfağımızda kullanılan ve sağlığa faydalı özellikleri olduğuna inanılan bir bitki olarak bilinmektedir.



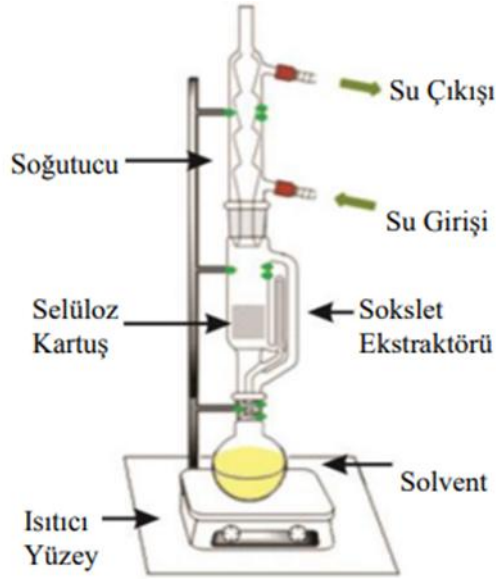
Şekil 1. Işkın (*Rheum ribes* L.) bitkisi (“*Rheum ribes* L. .jpg”, 2023)

Işkın bitkisinin (uşkun) genç kökleri ve gövdesi, kızamık, çiçek gibi hastalıkları önleme ve safra söktürücü olarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda bitkinin kökleri, diyabet tedavisinde etkili olabilir ve mide ülseri rahatsızlığını iyileştirici etkilere sahip olabilir. Işkın, bu çeşitli sağlık yararlarıyla bilinir ve geleneksel tıpta farklı amaçlarla kullanılan bir bitkidir (Özbek vd., 2002; Tosun ve Kızılay, 2003).

Işkın bitkisi, tıbbi açıdan ilk defa 1939 yılında incelenmeye başlanmıştır. Yüksek miktarda oksalik asit içeren ışkın, bu nedenle aşırı tüketilmemelidir, ancak pişirildiğinde bu etki azalmaktadır. Işkın, mide ağrısı, kusma, kızamık ve çiçek hastalıklarının semptomlarını azaltma özelliklerinin yanı sıra iştah arttırıcı etkilere sahiptir. Ayrıca kabızlık önleyici ve kanama durdurucu özelliklere

sahiptir. Işkın bitkisinin sindirim sistemini düzenlediği ve kök kısmının kurutulularak şeker ve tansiyon dengeleyici yaygın olarak kullanıldığı bilinmektedir. Işkın bitkisi, bol miktarda A, B ve C vitaminleri içermektedir. Ülkemizde, ışkın bitkisinin yaprakları, çiçekleri ve kökleri hem çiğ hem de pişmiş olarak tüketilebilmektedir. Bu bitki, bazı gram negatif bakterilere ve Herpes virüsüne karşı antimikrobiyal etkiler gösterir. Bu etkilerin özellikle İran'da yetişen türlerin kökleri, yaprakları ve gövdelerinde daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir. Rheum ribes' in fenolik yönünden yüksek içeriğine sahip olduğu, serbest radikal bağlama oranının diğer bitkilere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Zengin içeriği sebebiyle rahatça tüketilmesi gereken bir gıda olduğu düşünülmektedir (Meral, 2011).

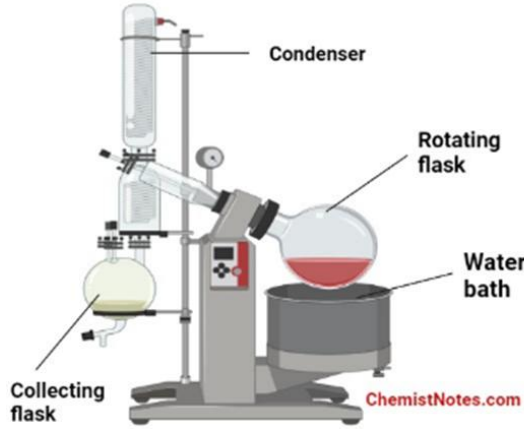
Soxhlet ekstraktörü, Franz von Soxhlet tarafından 1879 yılında katı bir deney numunesinden yağ çıkarmak amacıyla geliştirilen bir laboratuvar cihazıdır. İlk olarak yağları çıkarmak için tasarlanmış olmasına rağmen, bu cihaz katı bir bileşiğin ekstraksiyonu zor olduğu her durumda kullanılabilir. Soxhlet ekstraktörü, kuru numunenin yerleştirildiği, filtre kağıdından yapılan yüksük şeklindeki bir ekstraksiyon tüpüne sahiptir (Şekil 2).



Şekil 2. Soxhlet düzeneği (Guntero vd. 2017)

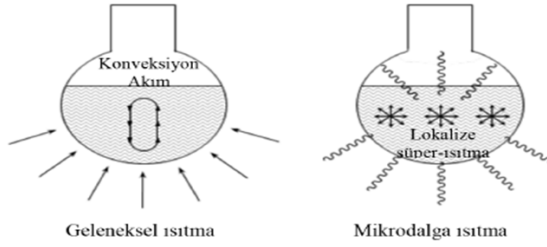
Ekstraktöre, içinde çözücü olan şilifli bir cam balon ve yoğunlaştırıcı takılır. Çözücü ısıtılır, buharlaştırılır. Sıcak çözücü buharı yoğunlaştırıcıya ilerleyip, yoğunlaşarak katı numunenin üzerine düşmektedir. İçerisinde katı numune bulunan ekstraksiyon tüpünün bulunduğu yüksük yoğunlaşan çözücü ile tamamen dolduğunda, bypass kolu seviyesine ulaşmakta ve sifon oluşturarak çözücü tekrar cam balona boşalmaktadır. Bu döngüye (yoğunlaşma, yükselme ve

sifon döngüsü), ‘reflux’ adı verilir ve bu işlem sürekli tekrar eder. Her döngüde, katının içerdiği bir miktar yağ çözücünde çözünür. Ancak çözücü, ısıtılan cam balona ulaştığında o kısımda kalır ve döngüye tekrar katılmaz. Bu durum, bu ekstraksiyon yönteminin en önemli avantajıdır; böylece sadece saf çözücü, katıyı ekstrakte etmek için buharlaşıp ve yoğunlaşarak döngüye katılır. Bu nedenle, Soxhlet ekstraktörü ile uygulanan bu yöntemin verimi, cam bir balonda katıyı çözücü içerisinde ısıtarak ekstrakte etme yönteminden daha yüksektir. Ekstraksiyon işleminin sonucunda geriye kalan çözücü, ekstrakte edilen kısmı bırakarak rotary buharlaştırıcısı ile uzaklaştırılabilir (Demir, 2015). Rotary buharlaştırıcısı Şekil 3’ te gösterilmektedir.



Şekil 3. Döner buharlaştırıcısı (“rotary-evaporator-introduction-working-principle”, 2023)

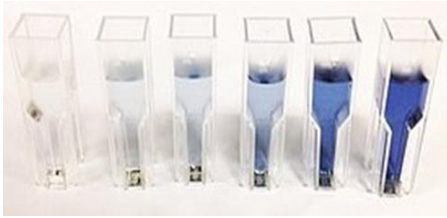
Mikrodalgalar, frekans aralığı 300 MHz ile 300 GHz arasında olan elektromanyetik alanlar olarak adlandırılmaktadır. Bu alanlarda elektrik alanı ile manyetik alan dik ve iki salınımlı olmaktadır. Mikrodalga sistemleri, polar maddeleri doğrudan ısıtma yeteneğine sahiptir. Elektromanyetik enerji, ortamdaki iyon akışıyla basınç oluşturur ve böylece ısı oluşmaktadır. Şekil 4’ de geleneksel ısıtma ve mikrodalga enerjisi ile ısıtma arasındaki akım farkı görülmektedir.



Şekil 4. Geleneksel ısıtma ve mikrodalga ısıtma (Letellier ve Budzinski, 1999)

İyonlar değişik yörüngelere kayarak moleküller arasında çarpışmalar meydana getirmektedir. Bozunmanın az olduğu organik ve organometalik bileşikleri elde etmek için seçici olarak kullanılan ekstraksiyon tekniği Mikrodalga destekli ekstraksiyondur. Organik solvent ve enerji kullanımının az olması bu ekstraksiyon yöntemini yeşil ekstraksiyon yöntemi olarak adlandırmaktadır (Azmir vd. 2013).

Bir numunedeki toplam fenolik içerik, Folin-Ciocalteu yöntemiyle kolorimetrik olarak ölçülebilir ve eşdeğer gallik asit kütlesi ile ifade edilebilmektedir (Kate, 2014). Folin-Ciocalteu reaktifi, fosfomolibdik asit ve heteropolifosfotungstik asitten oluşan karmaşık bir çözeltidir (Nurhayati vd., 2012). Bu yöntemin temel prensibi fenolik-hidroksil gruplarının oksidasyonudur. Folin-Ciocalteu reaktifi fenolikleri oksitler ve heteropoli asitleri bir molibden-tungsten (Mo-W) kompleksine indirger (Ikram, 2017). Reaksiyon sırasında, fenolik-hidroksil grubu, Folin-Ciocalteu reaktifi ile reaksiyona girince mavi bir fosfotungstat-fosfomolibdat kompleksi oluşturur (Blainski vd., 2013). Test çözeltisindeki fenolik bileşiklerin konsantrasyonu ne kadar yüksekse, reaksiyon sonucu oluşan mavi renk o kadar konsantre olacaktır (Şekil 5).



Şekil 5. Folin-Ciocalteu reaktifi ile mavi renk dönüşümü (‘Folin-Ciocalteu_reagent’, 2023)

Folin-Ciocalteu yöntemi basit, hassas ve kapsamlı bir yöntemdir. Bu yöntem alkali bir ortamda gerçekleşir, böylece Folin-Ciocalteu reaktifi ile fenolik içeriğin belirlenmesinde alkali bir atmosfer oluşturmayı amaçlayan sodyum karbonat (Na_2CO_3) kullanılmaktadır (Kate, 2014). Bu yöntemin basit ve tekrarlanabilir olması fenolik antioksidan çalışmalarında sıklıkla kullanılmasını sağlamaktadır.

Gallik asit, ilk defa 1736 yılında Carl Wilhem Scheele tarafından bitkilerde bulundu. Gallotanenler ailesine aittir ve bir şeker ünitesi ile farklı sayıda fenolik asit molekülünü içerir. Bu bileşik kristal bir katıdır, açık sarı renkte veya renksiz olabilir. Gallik asit, flavonoid olmayan fenolik bir bileşiktir. Hidroksibenzoik asit türevi olan gallik asit fenolik bileşen ölçümlerinde ölçüm standardı olarak kullanılmaktadır. Bitkilerin toplam fenolik içeriğine eşdeğer olarak toplam fenolik içeriğin belirlenmesi ile ilgili birçok çalışmada sıklıkla kullanılmaktadır (Kate, 2014). Yapmış olduğumuz çalışmada bitki ekstraktlarında bulunan toplam fenolik madde miktarı analizleri Folin-Ciocalteu yöntemi ile belirlenecek olup, toplam fenolik madde miktarları gallik asit eşdeğeri cinsinden belirlenecektir.

YÖNTEM ve BULGULAR

Bu çalışmada kullanılan Işkın otu (*Rheum ribes*) örnekleri, Diyarbakır ili Kulp ilçesinin yüksek rakımlı bölgelerinden temin edilmiştir. Bitkilerin gölgede kurutulan kısımları, laboratuvar tipi öğütücüde öğütülerek 1,15 mm partikül boyutuna getirilmiştir. Nem içeriğinin tamamen giderilmesi amacıyla numuneler, 3 saat boyunca etüvde kurutulmuş ve ekstraksiyon işlemi için hazır hale getirilmiştir. Her bir ekstraksiyon işlemi için, 10 gram öğütülmüş bitki numunesi filtre kağıdı ile sarılarak Soxhlet ekstraksiyon ünitesine yerleştirilmiştir. Şilifli cam balon içerisine 300 mL çözücü (etanol, metanol, aseton, n-hekzan) ilave edilmiş ve üzerine yoğunlaştırıcı takılmıştır. Isıtıcı çalıştırılarak ekstraksiyon işlemi başlatılmıştır. Ekstraksiyon işlemleri, her bir çözücü için 6 saat ve 24 saat olmak üzere iki farklı sürede gerçekleştirilmiştir. Ekstraksiyon sonucunda elde edilen çözücü–ekstrakt karışımından çözücüü uzaklaştırmak amacıyla, IKA marka döner buharlaştırıcı ve PC 3001 VARIO Pro diyaframalı vakum pompası kullanılmıştır. Bu işlem 40 °C sıcaklıkta, 142–175 mbar basınç aralığında ve 45–85 rpm dönüş hızıyla gerçekleştirilmiştir. Ek olarak, ışkın otu ve metanol kullanılarak yapılan ekstraksiyon işleminde numune, 4 dakika mikrodalga ışınlamaya maruz bırakıldıktan sonra 6 saatlik Soxhlet ekstraksiyonuna tabi tutulmuştur. Elde edilen bitki özütü, 500 kat seyreltilerek Folin-Ciocalteu yöntemi ile analiz edilmiş ve toplam fenolik madde miktarı gallik asit eşdeğeri (GAE) cinsinden hesaplanmıştır.

Tablo 1. Işkın otunun farklı çözücü ve sürelerdeki Toplam Fenolik Madde Miktarı (TFM miktarı)

Bitki+ Çözücü	Süre(saat)	TFM Miktarı (mg GAE/ 10 g KM)
Işkın otu+ Metanol	6	6,786
Işkın otu+ Metanol	24	26,33
Işkın otu+ Etanol	6	6,015
Işkın otu+ Etanol	24	7,40

Işkın otu + Aseton	6	2,16
Işkın otu + Aseton	24	3,06
Işkın otu + n- Hekzan	6	0,116
Işkın otu + n- Hekzan	24	0,311

Yukarıdaki sonuçlara göre, ışkın otu ile 24 saat süreyle metanol kullanılarak yapılan ekstraksiyon, en yüksek TFM miktarına ulaşarak fenolik madde açısından en verimli sonuç vermiştir. Tüm çözücülerde 24 saatlik ekstraksiyon süresi, 6 saatlik sürelerle göre daha yüksek değerler vermiştir. Bu durum, ekstraksiyon süresi arttıkça çözünen fenolik madde miktarının da arttığını göstermektedir.

Mikrodalga destekli ekstraksiyon yöntemi ile elde edilen sinir otu özütünün toplam fenolik madde miktarı 10,3 mg GAE/10 g KM, klasik Soxhlet ekstraksiyon yöntemi ile ise 6,78 mg GAE/10 g KM olarak tespit edilmiştir. Elde edilen bu sonuç, mikrodalga destekli yöntemin fenolik bileşiklerin ekstraksiyonunda daha etkili olduğunu göstermektedir. Literatür araştırmalarına göre, bu farkın temel nedeni mikrodalga radyasyonunun çözücü ve bitki hücrelerindeki polar molekülleri doğrudan uyararak hızlı ve homojen bir ısıtma sağlamasıdır. Bu durum, hücre zarlarının daha kolay parçalanmasına ve fenolik bileşiklerin daha etkin bir şekilde serbest bırakılmasına neden olmaktadır. Ayrıca mikrodalga işlemi sırasında bitki dokusunda oluşan iç basınç, hücre duvarlarını parçalayarak içerikteki fenolik maddelerin çözücüye geçişini kolaylaştırır. Kısa sürede uygulanan bu yöntem, fenolik bileşiklerin ısıya bağlı bozunmasını da minimuma indirerek verimi artırmaktadır. Tüm bu faktörler bir araya geldiğinde, mikrodalga destekli ekstraksiyonun klasik Soxhlet yöntemine kıyasla daha verimli olduğu anlaşılmaktadır.

TEşEKKÜR

Bu alışma Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.(Proje no: FYL-2022-4144)

KAYNAKLAR

- Azmir, J., Zaidul, M., Rahman, M., Sharif, K., Mohamed, A. ve Sahena, F. (2013). "Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials: A review". *Journal of Food Engineering*, 117 (4), 426-436.
- Blainski, A., Mello, J. C. P. ve Lopes, G.C. (2013). "Application and Analysis of the Folin Ciocalteu Method for the Determination of the Total Phenolic Content from *Limonium Brasiliense* L.". *Molecules*, 18 (6), 6853-6862.
- Cimanga, K., Kambu, K., Tona, L., Apers, S., De Bruyne, T., Hermans, N. ve Vlietinck, A. J. (2002). "Correlation between chemical composition and antibacterial activity of essential oils of some aromatic medicinal plants growing in the Democratic Republic of Congo". *Journal of Ethnopharmacology*, 79 (2), 213- 220.
- Demir, A. (2015). *Onosma Halophila' nın Farklı Ekstraksiyon Yöntemleri İle Ekstraksiyonu ve Ekstraksiyon Verimlerinin Karşılaştırılması (Yüksek Lisans Tezi)*. Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.
- Guntero, V.A., Mancini, P.M. ve Kneeteman, M.N. (2017). "Introducing Organic Chemistry Students to the Extraction of Natural Products Found in Vegetal Species". *World Journal of Chemical Education*, 5 (4), 142-147.
- Hsieh, P. C., Mau, J. L. ve Huang, S. H. (2001). "Antimicrobial effect of various combinations of plant extracts". *Food Microbiology*, 18 (1), 35-43.
- Ikram, K. (2017). "Penentuan Total Fenolik dan Aktivitas Antioksidan Ekstrak Etanolik Daun Samama (*Anthocephalus macrophyllus*) Asal Ternate, Maluku Utara". *Jurnal Kimia Mulawarman*, 15 (1), 11-17.
- Kate, D. I. (2014). *Penetapan Kandungan Fenolik Total dan Uji Aktivitas Antioksidan dengan Metode DPPH (1,1-diphenyl-2-pikrilhidrazil) Ekstrak Metanolik Umbi Bidara Upas (Merremia mammosa (Lour) Hallier f.) (Skripsi thesis)*. Sanata Dharma University, Indonesia.
- Letellier, M. ve Budzinski, H. (1999). "Microwave assisted extraction of organic compounds". *Analisis*, 27 (3), 259.
- Madhuri, S. ve Pandey, G. (2009). "Some anticancer medicinal plants of foreign origin". *Current Science*, 96 (6), 779-783.
- Meral, R. (2011). *Fonksiyonel Öne Sahip Doğal Bileşenlerin Hamur ve Ekmek Özellikleri Üzerine Etkilerinin Belirlenmesi*. Yayınlanmamış Doktora tezi. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
- Özbek, H., Ceylan, E., Kara, M., Özgökçe, F. ve Koyuncu, M. (2002). "Rheum ribes (Uşkun) kökü ekstresinin sağlıklı ve diyabetli farelerdeki hipoglisemik

etkisi’’, 14. Bitkisel İlaç Hammaddeleri Toplantısı, 29-31 Mayıs 2002, Eskişehir.

Tosun, F. ve Kızılay, Ç. A. (2003). ‘’Anthraquinones and flavonoids from rheum ribes’’. Ankara Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Dergisi, 32 (1), 31-35.

Veeresham, C. (2012). ‘’Natural products derived from plants as a source of drugs’’. Journal of Advanced Pharmaceutical Technology & Research, 3 (4), 200



BÖLÜM 6

Türkiye’de Tıbbi Jeoloji Açısından Dikkat Çeken Çevresel Faktörler

Serdar Baler¹

1) Giriş

1.1) Tıbbi Jeoloji, İklim ve Halk Sağlığı Arasındaki İlişki

Tıbbi jeoloji, jeolojik çevre, hayvan ve insan sağlığı arasındaki etkileşimlerini ve çevresel faktörlerin sağlık sorunlarının coğrafi dağılımı üzerine etkisini disiplinler arası inceleyen bir alan olarak tanımlanmaktadır (Selinus vd., 2005; Selinus vd., 2013). Bu alan, kayaçlar, topraklar, yer altı ve yüzey suları ile atmosferik süreçler sonucunda ortaya çıkan doğal çevresel etkilerin, insan sağlığı üzerindeki olumlu ve olumsuz yönlerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır (Plant vd., 2001). Jeolojik süreçler çoğu zaman çevrenin doğal işleyişinin bir parçasıdır ancak, uzun süreli ve kontrolsüz maruziyetler halk sağlığı açısından risk oluşturabilmektedir (Alloway, 2013).

Jeolojik çevre ile sağlık arasındaki ilişki, yalnızca tek bir değişkene bağlı olmayıp, çok sayıda çevresel faktörün birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir. Lokal jeolojik özellikler, mineralojik ve petrografik bileşim, hidrojeolojik koşullar ve atmosferik süreçler, çevresel maruziyetin niteliğini belirleyen temel unsurlar arasında yer almaktadır (Reimann & Garrett, 2005). Bu doğrultuda tıbbi jeoloji, çevre sağlığına ilişkin sorunların anlaşılmasında multidisipliner bir bakış açısı sunmaktadır (Centeno vd., 2016).

İklim özellikleri ve iklim değişkenliği, jeolojik kökenli çevresel faktörlerin davranışını ve insanlarla temas yollarını önemli ölçüde etkilemektedir (IPCC, 2023). Kuraklık, aşırı yağış, sıcaklık artışları ve ekstrem hava olayları gibi iklimle ilişkili süreçler, toprak, su ve atmosfer ortamlarında bulunan doğal bileşenlerin taşınımını, yoğunluğunu ve erişilebilirliğini değiştirebilmektedir (Taylor vd., 2013). Bu durum, tıbbi jeoloji kapsamında değerlendirilen çevresel riskleri tek başına değil, iklim faktörlerini de gözетerek birlikte ele alınmasını gerekli kılmaktadır.

¹ Öğretim Görevlisi Doktor, Malatya Turgut Özal Üniversitesi- Hekimhan Mehmet Emin Sungur Meslek Yüksekokulu- Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü
ORCID: 0000-0001-9148-2014

Sürdürülebilirlik terimi, iklim değişikliği açısından çoğu zaman enerji ve doğal kaynak yönetimi ile ilişkilendirilmekle beraber, halk sağlığının korunması da sürdürülebilirliğin temel bileşenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir (WHO, 2017). Buna bağlı olarak, tıbbi jeoloji, jeolojik ve çevresel süreçlerin birlikte değerlendirilmesinin çevresel sağlık risklerinin farkındalığı ve yönetilmesi açısından önemli bir multidisipliner bakış açısı sunduğu bir alandır (Centeno vd., 2016). Bu yaklaşım, özellikle jeolojik ve iklimsel çeşitliliğin fazla olduğu ülkelerde, çevre-sağlık-insan etkileşiminin daha doğru biçimde anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.

Bu bölümde, Türkiye'de tıbbi jeoloji, iklim değişikliği ve halk sağlığı açısından önemli olan çevresel faktörler ele alınmakta; ayrıca jeoloji, iklim değişikliği ve sağlık arasındaki ilişkiler daha geniş bir bağlamda incelenmektedir.

2) Türkiye'nin Jeolojik ve İklimsel Çerçevesi

Türkiye, jeolojik ve tektonik açıdan oldukça karmaşık bir yapıya sahip olup, farklı yaşta ve kökende kayaç birimlerinin bir arada bulunduğu bir coğrafyada yer almaktadır. Bu çeşitlilik, ülkenin farklı bölgelerinde mineralojik, petrografik, jeokimyasal ve hidrojeolojik koşulların farklı olmasına neden olmaktadır (MTA, 2010; Okay & Tüysüz, 1999). Bu jeolojik çeşitlilik, tıbbi jeolojide dikkate alınan çevresel faktörlerin mekânsal dağılımı ve etkileriyle doğrudan ilgilidir.

Türkiye'nin aktif tektonik yapısı, yaygın fay sistemleri ve kırıklı-çatlaklı kayaç ortamları ile uyumludur. Bu yapısal özellikler yeraltı suyunun hareketinde, kaya ve su etkileşiminde ve bazı jeokimyasal elementlerin çevresel ortamlara taşınmasında anahtar rol oynamaktadır (Emre vd., 2013; Uzelli vd., 2021). Aktif fay zonları boyunca gelişen hidrojeolojik sistemler, tıbbi jeoloji açısından hem doğal zenginleşmeler hem de potansiyel sağlık riskleri bakımından dikkatle değerlendirilmesi gereken alanlar arasında yer almaktadır.

İklimsel açıdan bakıldığında, Türkiye farklı iklim tiplerinin etkisi altında bulunan bir geçiş bölgesi niteliğindedir. Kıyı bölgelerde daha nemli ve ılıman iklim koşulları egemen olup, iç ve güneydoğu kesimlerde ise yarı kurak ve kurak iklim özellikleri gözlenmektedir. (Türkeş, 2010). Bu iklimsel farklılık, toprak oluşumu, yüzey ve yer altı suyu sistemlerinin bütünüyle, jeolojik kökenli çevresel faktörlerin davranışını doğrudan etkilemektedir.

İklim değişkenliği ve iklim değişikliği süreçleri, Türkiye'de çevresel sistemler üzerinde giderek artan bir baskı oluşturmaktadır. Artan sıcaklıklar, yağış rejimindeki düzensizlikler, kurak alanların artışı ve yoğun hava olayları, su kaynakları ve toprak sistemleri üzerinde önemli değişimlere yol açabilmektedir

(IPCC, 2023; Türkeş, 2012). Bu değişimler, tıbbi jeoloji kapsamında ele alınan jeolojik kökenli unsurların taşınımı, yoğunluğu ve insanlarla etkileşim yollarını yeniden şekillendirebilmektedir.

Türkiye'deki çevre sağlığı risklerini anlamak için hem jeolojik hem de iklimsel faktörleri bir arada görmek çok önemlidir. Jeolojik çevrenin doğal potansiyelleri iklim ile etkileşime girdiğinde bazı alanlar uzun süreli sağlık etkileri yaşayabilmektedir (Reimann & Garrett, 2005; Selinus vd., 2005). Bu nedenle, Türkiye'nin jeolojik ve iklimsel sınırlarının tıbbi jeoloji çalışmalarında bütüncül bir yaklaşımla ele alınması gerekir.

Bu bölümde sunulan jeolojik ve iklimsel çerçeve, bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak ele alınan tıbbi jeoloji açısından dikkat çeken çevresel faktörlerin anlaşılması için temel bir zemin oluşturmaktadır.

3) Doğal Jeokimyasal Unsurlar ve İnsan Sağlığı Üzerindeki Olası Etkileri

Tıbbi jeoloji kapsamında çevresel faktörler değerlendirilirken, doğal jeokimyasal süreçler sonucunda toprak, su ve biyosferde bulunan elementlerin insan sağlığı üzerindeki etkileri önemli bir yer tutmaktadır (Selinus vd., 2005; Selinus, 2004). Yer kabuğunun mineralojik ve jeokimyasal özellikleri, çevresel ortamlarda bulunan elementlerin türünü ve dağılımını belirlemekte; bu durum uzun süreli maruziyetler yoluyla sağlık üzerinde olumlu ya da olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir (Alloway, 2013).

Karmaşık tektonik yapılar ve farklı jeolojik birimlerin bir arada bulunması, doğal jeokimyasal çeşitliliğin artmasına neden olmaktadır (Reimann & Garrett, 2005). Bu tanıma göre Türkiye, doğal jeokimyasal çeşitlilik açısından dikkat çeken ülkelerden biridir. Volkanik kayalar, karbonat oluşumları ve metalojenik kuşaklar, bazı elementlerin çevrede doğal olarak daha bol hale gelmesine neden olabilir. Bu şekilde meydana gelen bir jeokimyasal zenginleşme, toprak ve yeraltı suyu yoluyla insanlarla temas edebilir ve uzun vadede sağlığa zararlı olabilir (Sharma vd., 2025).

Atmosferik etkilerle beraber iklimsel özellikler, doğada bulunan elementlerin jeokimyasal davranışını ve taşıma mekanizmalarını doğrudan etkiler (IPCC, 2023; Mukherjee vd., 2024; Dao vd., 2024). Kuraklık koşullarının artan yaygınlığı, hem yeraltı hem de yüzey sularında çözünmüş halde bulunan elementlerin daha yüksek konsantrasyonlara varmasına yol açabilir, sonuçta bu durum içme suyu kalitesi için potansiyel riskler oluşturabilir (Edmunds & Smedley, 2013). Öte yandan, şiddetli yağmur ve sel, elementleri topraktan ve ana

kayaçtan daha geniş alanlara taşıyabilir ve bu da maruz kalma alanlarını büyütebilir (Taylor vd., 2013; Ponting vd., 2021).

Bu doğrultuda, iklim değişkenliği yalnızca çevresel bir faktör olarak değil, aynı zamanda tıbbi jeoloji perspektifinden risk artırıcı bir faktör olarak da değerlendirilmektedir (Selinus vd., 2013). Sürdürülebilir iklim ve çevre yönetimlerini kapsayan yaklaşımlar, doğal jeokimyasal süreçlerin oluşturduğu risklerin belirlenmesi, takip edilmesi ve yönetilmesi için kritik öneme sahiptir. Yerel jeolojik ve hidrojeolojik özellikleri dikkate alan bütüncül değerlendirmeler, halk sağlığını korumak için en önemli araçlar arasındadır (WHO, 2017).

3.1) Yer Altı Suları, Kayaç-Su Etkileşimi ve Doğal Afetlerle İlişkisi

Yer altı suları, tıbbi jeoloji kapsamında hem doğal jeokimyasal süreçler hem de jeodinamik olaylarla ilişkili olarak değerlendirilmesi gereken çevresel bileşenler arasında yer almaktadır. Yer altı suyunun kimyasal özellikleri, suyun dolaşım süresi, temas ettiği kayaçların mineralojik yapısı ve yapısal zayıflık zonları tarafından belirlenmektedir (Appelo & Postma, 2005; Edmunds & Smedley, 2013). Bu özellikler, uzun süreli maruziyetler söz konusu olduğunda insan sağlığı açısından önem kazanmaktadır (WHO, 2017).

Türkiye’de yer altı sularının dağılımı ve kimyasal bileşimi, aktif tektonik yapı, yaygın fay sistemleri ve kırıklı-çatlaklı kayaç ortamları ile yakından ilişkilidir (MTA, 2010; DSİ, 2016). Fay zonları ve kırık sistemleri, yer altı sularının dolaşımını kolaylaştıran geçirgen yapılar oluşturarak, su-kayaç etkileşimini artırabilmektedir. Bu durum, bazı elementlerin ve çözünmüş bileşenlerin yer altı sularına daha etkin şekilde geçmesine neden olabilmektedir (Smedley & Kinniburgh, 2002; Foster & Chilton, 2003). Sıcaklık ise, fay zonlarıyla ilişkili olup, su-kayaç etkileşimi esnasında çözünme miktarını etkilemektedir.

Deprem gibi jeolojik kökenli doğal afetler, yer altı suyu sistemleri üzerinde hem fiziksel hem de kimyasal değişimlere yol açabilmektedir. Depremler sırasında oluşan yeni çatlaklar, mevcut fay zonlarının yeniden etkinleşmesi ve hidrolik iletkenliğin değişmesi, yer altı suyu akım yollarını ve su kimyasını etkileyebilmektedir (Manga & Wang, 2007; Wang & Manga, 2010). Bu tür değişimler, bazı bölgelerde yer altı suyu seviyelerinde ani yükselmelere, düşüşlere veya suyun akış yönünün tamamen değişmesine neden olabileceği gibi ayrıca çözünmüş maddelerin konsantrasyonlarında farklılaşmalara neden olabilmektedir.

İklim değişkenliği ile birlikte değerlendirildiğinde, kuraklık dönemlerinin uzaması ve su kaynakları üzerindeki baskının artması, fay ve çatlak sistemleri

boyunca dolaşan yer altı sularının daha yoğun ve uzun süreli kullanımını beraberinde getirmektedir (IPCC, 2023; Appelo & Postma, 2005). İhtiyaç duyulan bu artış, deprem ve erozyon gibi ani jeolojik olaylar sonrasında su kalitesinde meydana gelebilecek değişikliklerin halk sağlığı açısından daha kritik hale gelmesine neden olabilmektedir.

Sürdürülebilir iklim ve afet yönetimi yaklaşımları çerçevesinde, yer altı sularının jeolojik yapı ve tektonik özelliklerle birlikte değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Tıbbi jeoloji açısından bakıldığında, aktif fay hatlarına ve kırık ortamlara bağlı su kaynaklarının düzenli olarak izlenmesi, potansiyel sağlık risklerini erken tespit etmeye yardımcı olabilecek önemli bir araçtır (Selinus vd., 2013; WHO, 2017). Bu kapsayıcı yaklaşım, doğal afetlere dayanıklı çevre yönetimini iyileştirmeye ve halk sağlığını korumaya yardımcı olacaktır.

3.2. Jeolojik Kökenli Toz ve Parçacıklar

Jeojenik toz ve parçacıklar, tıbbi jeoloji alanında solunum sistemiyle ilgili sağlık etkileri açısından önemli çevresel faktörlerdir. Doğal süreçler, kayaçların parçalanmasına, toprakların kurumasına ve yüzey malzemelerinin atmosfere taşınmasına yol açarak ince parçacıkların oluşmasına ve dağılmasına neden olur (Goudie, 2014; Middleton, 2017). Bu parçacıklar, sahip oldukları farklı fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı insan sağlığı üzerinde farklı olumsuz etkiler yaratabilir (WHO, 2013).

Türkiye’de jeolojik yapı, topoğrafya ve iklim koşullarının birlikte etkisi ve atmosferik süreçlere bağlı etkiler, farklı bölgelerde jeolojik kökenli toz oluşumunu destekleyen uygun ortamlar yaratmaktadır. Özellikle kurak ve yarı kurak alanlar, ince taneli yüzey malzemelerinin rüzgâr etkisiyle kolayca taşınabildiği alanlar olarak öne çıkmaktadır (Goudie & Middleton, 2006). Bu tür tozlar yalnızca mineral parçacıkları değil, aynı zamanda doğal olarak bulunan bazı elementleri ve mineralleri de bünyelerinde taşıyabilmektedir (Reimann & de Caritat, 2017).

İklim değişkenliği, jeolojik kökenli toz ve partiküllerin oluşumu ve taşınımı üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Artan sıcaklıklar, yağış rejimindeki düzensizlikler ve kuraklık eğilimleri, toprak neminin azalmasına ve yüzeylerin rüzgâr erozyonuna daha açık hale gelmesine neden olmaktadır (IPCC, 2023). Bu süreçler, toz fırtınalarının sıklığını ve etkilediği alanların genişliğini artırarak maruziyet risklerini yükseltebilmektedir (Middleton & Kang, 2017).

Doğal afetler bağlamında değerlendirildiğinde, kuraklık ve çölleşme süreçleri jeolojik kökenli toz oluşumunu artıran başlıca faktörler arasında yer almaktadır.

Öyle ki, deprem gibi jeodinamik olaylar sonrasında meydana gelen yüzey bozulmaları, heyelanlar ve zemin gevşemeleri de kısa vadede toz ve partikül oluşumunu tetikleyebilmektedir (UNDRR, 2019). Bu tür olaylar sonrasında ortaya çıkan ince taneli malzeme, özellikle rüzgârlı koşullarda çevreye yayılabilmekte ve bazı zararlı gazlar bu taneciklere yapışarak solunum yoluyla insanlara ulaşabilmektedir.

Jeolojik kökenli toz ve partiküllerin sağlık üzerindeki etkilerinin azaltılması önemli bir hedef olarak değerlendirilmektedir. Tıbbi jeoloji açısından bakıldığında riskli alanların belirlenmesi, arazi kullanımının jeolojik ve iklim koşullarını dikkate alacak şekilde planlanması ve çevresel izleme çalışmalarının güçlendirilmesi, halk sağlığının korunmasına yardımcı olabilecek en önemli adımlardan bazılarıdır (Selinus vd., 2013; WHO, 2013).

4) Sürdürülebilir İklim Yaklaşımı ve Halk Sağlığı

Sürdürülebilir iklim kapsayıcılığı, çevre, insan ve sağlıktan meydana gelen sistemin uzun süreli korunmasını ve insan faaliyetleri ile doğal koşullar arasındaki dengenin gözetilmesini amaçlayan bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır (IPCC, 2023). Bu yaklaşım, sadece iklim sisteminin baskılarının azalmasını değil, aynı zamanda değişimlerin insan sağlığı üzerindeki etkilerinin yayılmasını da içerir. Sürdürülebilirlik, bu açıdan halk sağlığı ile doğrudan bağlantılı bir kavram olarak kabul edilmektedir (WHO, 2017).

Tıbbi jeoloji perspektifi, iklim değişkenliği, jeolojik olarak türetilen çevresel faktörlerin davranışını ve maruz kalma yollarını önemli ölçüde etkiler. Kuraklık, aşırı yağış, artan sıcaklıklar ve aşırı hava olayları, toprak, su ve atmosferik ortamlardaki doğal bileşenlerin taşınmasını, miktarını ve erişilebilirliğini değiştirebilir (Taylor vd., 2013; Selinus vd., 2013). Bu durum, iklim değişikliği ile birlikte jeolojik çevre kaynaklı sağlık risklerinin daha karmaşık ve öngörülmesi güç bir hâl almasına neden olmaktadır.

Türkiye gibi jeolojik-iklimsel çeşitliliği yüksek ülkelerde tıbbi jeolojinin yanı sıra sürdürülebilir iklim yaklaşımlarını da göz önünde bulundurmak büyük önem taşımaktadır. Yerel jeolojik etmenlerin dikkate alınmadığı çevre ve iklim politikaları, bazı bölgelerde doğal jeokimyasal maruziyetlerin ve su-toprak-hava kaynaklı sağlık risklerinin göz ardı edilmesine yol açabilmektedir (Reimann & Garrett, 2005). Bu nedenle, sürdürülebilirlik kavramının jeolojik çevre boyutunu da içerecek şekilde genişletilmesi gerekmektedir.

Halk sağlığı yaklaşımlarında sürdürülebilirlik, çevresel risklerin ortaya çıkmadan önce belirlenmesini ve önleyici politikaların geliştirilmesini

hedeflemektedir. Tıbbi jeoloji bu noktada, jeolojik kökenli çevresel faktörlerin haritalanması, riskli alanların tanımlanması ve uzun süreli maruziyetlerin izlenmesi açısından önemli katkılar sunmaktadır (Selinus vd., 2005). Bu tür çalışmaların artması, iklim değişikliği ile birlikte artması muhtemel çevresel sağlık risklerine karşı toplumların direncini artırabilecek bilimsel bir zemin oluşturmaktadır.

İklim değişikliği ve doğal afetler arasındaki ilişkinin giderek daha belirgin hâle gelmesi, sürdürülebilir iklim yaklaşımının afet risk azaltma politikalarıyla da entegre edilmesini gerekli kılmaktadır. Deprem, sel, kuraklık ve heyelan gibi olaylar sonrasında ortaya çıkan çevresel değişimler, tıbbi jeoloji kapsamında değerlendirilen maruziyet yollarını kısa ve orta vadede etkileyebilmektedir (UNDRR, 2019). Buna göre, sürdürülebilir çevre ve halk sağlığı yönetiminin temel bir bileşeni olarak ortaya çıkan jeolojik çevre, iklim ve sağlık arasındaki ilişkiler toplu olarak ele alınmalıdır.

Sonuç olarak, sürdürülebilir iklim yaklaşımı ile tıbbi jeolojinin birlikte değerlendirilmesi, jeolojik faktörlerden kaynaklanan sağlık risklerinin genişliği ve bütüncül bir perspektif sunmaktadır. Bu yaklaşım, yalnızca çevresel sistemleri korumayı değil aynı zamanda uzun vadede halk sağlığını da desteklemeyi amaçlayan sürdürülebilir bir gelecek vizyonuna katkıda bulunmaktadır (WHO, 2017; IPCC, 2023).

5) Değerlendirme ve Sonuç

Bu bölüm, jeolojik çevre, iklim değişkenliği, doğal afetler ve halk sağlığı arasındaki ilişkilere odaklanarak Türkiye'de öne çıkan çevresel faktörleri tıbbi jeoloji perspektifinden ele almaktadır. Yeraltı suyu, jeojenik toz ve parçacıklar gibi doğal jeokimyasal unsurların, iklim koşulları ve jeodinamik süreçlerle birlikte değerlendirildiğinde insan sağlığı üzerinde daha belirgin etkileri olduğu açıktır (Selinus vd., 2013).

Türkiye'nin jeolojik ve iklimsel çeşitliliği, hem konumsal olarak hem de maruziyet olarak farklılıkların ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Aktif tektonik kuşaklar, fay sistemleri, kırık-çatlak kaya ortamları ve iklim geçiş bölgeleri, tıbbi jeolojide ele alınan çevresel faktörlerin mekansal dağılımını doğrudan etkiler (Reimann & Garrett, 2005; Şengör vd., 2005). Bu durum, çevresel sağlık risklerinin genel, bölgesel ve yerel koşullara daha duyarlı yaklaşımlarla ele alınmasını gerektirir.

İklimsel farklılıkların etkileri daha da şiddetlendikçe, jeolojik kökenli çevresel faktörlerle ilişkili sağlık risklerinin gelecekte daha karmaşık ve öngörülemez hale

gelmesi mümkündür. Kuraklıkların sıklığındaki artış, yeraltı suyu kaynakları üzerindeki baskıyı artırabilir ve su kalitesiyle ilgili sorunları daha belirgin hale getirebilirken, aşırı yağış ve aşırı hava olayları jeokimyasal elementlerin taşınmasını hızlandırarak yeni maruz kalma alanlarının ortaya çıkmasına neden olabilir (Edmunds & Smedley, 2013; Taylor vd., 2013; IPCC, 2023).

Doğal afetler, özellikle deprem, sel, heyelan ve kuraklık gibi olaylar, tıbbi jeoloji perspektifinden bakıldığında, çevresel faktörlerin etkilerini kısa, orta ve uzun vadede artırabilmektedir. Depremler sonrasında yer altı suyu sistemlerinde meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişimler, su kalitesi ve erişilebilirliği açısından halk sağlığı üzerinde dolaylı etkiler yaratabilmektedir (Manga & Wang, 2007). Sismik aktivite öncesi ve sonrasında yeraltından atmosfere yayılan radon gibi gazlar ise fazla maruziyet ortamlarında halk sağlığı açısından zararlı olabilmektedir. Benzer şekilde, kuraklık ve çölleşme süreçleri, jeolojik kökenli toz ve partikül oluşumunu artırarak solunum sistemi ile ilişkili sağlık risklerini daha görünür hâle getirebilmektedir (Goudie, 2014; WHO, 2013). Bu bağlamda, afet kuşakları içerisinde yer alan bölgelerde çevresel maruziyetlerin daha dikkatli değerlendirilmesi gerekmektedir.

Güncel afet yönetimi yaklaşımları, müdahale odaklı anlayıştan uzaklaşarak afet risk azaltma ve önleyici planlama kavramlarını ön plana çıkarmaktadır (UNDRR, 2015). Tıbbi jeoloji, jeolojik ve iklimsel verilerin birlikte değerlendirilmesi yoluyla riskli alanların belirlenmesi, çevresel maruziyet yollarının tanımlanması ve halk sağlığını önceleyen planlamaların yapılması açısından afet yönetimi süreçlerine önemli katkılar sunmaktadır (Selinus vd., 2013). Jeolojik yapı, afet kuşakları ve iklimsel eğilimlerin birlikte ele alındığı bütüncül yaklaşımlar, çevresel sağlık risklerinin yönetilmesinde etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır.

Bu çerçevede, sürdürülebilir iklim yaklaşımı ile tıbbi jeolojinin birlikte değerlendirilmesi, jeolojik kökenli çevresel faktörlerden kaynaklanan sağlık risklerinin anlaşılması ve yönetilmesi açısından bütüncül bir bakış açısı sunmaktadır. İklim değiştikçe jeokimyasal süreçlerin etkisi, yeraltı su sistemleri, jeojenik toz ve partiküllerin oluşumu ve maruziyet farklılaşmaktadır. Bu durum ise, çevresel maruz kalma yollarını daha karmaşık ve öngörülmesi daha zor hale getirir. Dolayısıyla, tıbbi jeoloji yalnızca mevcut risklerin analiziyle birlikte, geleceğe yönelik risk senaryolarının oluşturulmasını da gerekli kılmaktadır.

Jeolojik ve iklim çeşitliliğinin yüksek olduğu ülkelerde, yerel jeolojik özellikleri, iklim eğilimlerini ve afet dinamiklerini bir arada ele alan disiplinler arası yaklaşımlar, çevre sağlığı risklerinin azaltılması açısından oldukça

önemlidir. Tıbbi jeolojinin düzenli izleme çalışmaları, risk haritalarının güncellenmesi ve afet öncesi planlamaların yapılması; Hem çevresel farkındalık yaratarak, birey-toplum-çevre etkileşiminin olumlu yönde sürdürülmesine hem de toplum sağlığının uzun süre korunmasına katkıda bulunabilecek en kritik stratejiler arasında yer almaktadır. Sürdürülebilir bir gelecek vizyonu bağlamında jeoloji, iklim ve sağlık arasındaki etkileşimlerin karar alma süreçlerine entegre edilmesi, bilime dayalı çevre ve halk sağlığı politikalarının geliştirilmesi için gerekli görünmektedir (WHO, 2017; IPCC, 2023).

Kaynakça

- Alloway, B. J. (2013). Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. In B. J. Alloway (Ed.), *Heavy metals in soils* (pp. 4–18). Springer.
- Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution* (2nd ed.). Rotterdam, Netherlands: A. A. Balkema.
- Centeno, J. A., Finkelman, R. B., & Selinus, O. (2016). Medical geology: Impacts of the natural environment on public health. *Geosciences*, 6(1), 8. <https://doi.org/10.3390/geosciences6010008>
- Dao, P. U., Heuzard, A. G., Le, T. X. H., Zhao, J., Yin, R., Shang, C., & Fan, C. (2024). The impacts of climate change on groundwater quality: A review. *Science of the Total Environment*, 912, 169241. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169241>.
- Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü. (2016). *2016 yılı faaliyet raporu*. Ankara, Türkiye: Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü.
- Edmunds, W. M., & Smedley, P. L. (2013). Fluoride in natural waters. In O. Selinus (Ed.), *Essentials of medical geology* (2nd ed., pp. 311–336). Dordrecht, Netherlands: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4375-5_13
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş., & Şaroğlu, F. (2013). *Active fault map of Turkey with an explanatory text (1:1,250,000 scale)*. Ankara, Türkiye: General Directorate of Mineral Research and Exploration (MTA), Special Publication Series No. 30.
- Foster, S., & Chilton, J. (2003). Groundwater: The processes and global significance of aquifer degradation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences*, 358(1440), 1957–1972. <https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1380>
- Goudie, A. S. (2014). Desert dust and human health disorders. *Environment International*, 63, 101–113. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.10.011>
- Goudie, A. S., & Middleton, N. J. (2006). *Desert dust in the global system*. Berlin, Germany: Springer. <https://doi.org/10.1007/3-540-32355-4>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2021: The physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü [MTA]. (2010). *Türkiye jeoloji haritası (1:500.000 ölçekli)*. Ankara, Türkiye: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.

- Manga, M., & Wang, C.-Y. (2007). Earthquake hydrology. In H. Kanamori (Ed.), *Treatise on geophysics* (Vol. 4, pp. 293–320). Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
- Middleton, N. J. (2017). Desert dust hazards: A global review. *Aeolian Research*, 24, 53–63. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.12.001>
- Middleton, N. J., & Kang, U. (2017). Sand and dust storms: Impact mitigation. *Sustainability*, 9(6), 1053. <https://doi.org/10.3390/su9061053>
- Mukherjee, A., Coomar, P., Sarkar, S., Johannesson, K. H., Fryar, A. E., Schreiber, M. E., & Vengosh, A. (2024). Arsenic and other geogenic contaminants in global groundwater. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5(4), 312–328.
- Okay, A. I., & Tüysüz, O. (1999). Tethyan sutures of northern Turkey. In A. Durand, L. Jolivet, F. Horváth, & M. Séranne (Eds.), *The Mediterranean basins: Tertiary extension within the Alpine orogen* (pp. 475–515). London, UK: Geological Society, Special Publications, 156.
- Plant, J. A., Smith, D., Smith, B., & Williams, L. (2001). Environmental geochemistry at the global scale. *Applied Geochemistry*, 16(11–12), 1291–1308.
- Ponting, J., Kelly, T. J., Verhoef, A., Watts, M. J., & Sizmur, T. (2021). The impact of increased flooding occurrence on the mobility of potentially toxic elements in floodplain soil: A review. *Science of the Total Environment*, 754, 142040. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142040>
- Reimann, C., & Garrett, R. G. (2005). Geochemical background—Concept and reality. *Science of the Total Environment*, 350(1–3), 12–27. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.01.047>
- Reimann, C., & de Caritat, P. (2017). Establishing geochemical background variation and threshold values for 59 elements in Australian surface soil. *Science of the Total Environment*, 578, 633–648. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.010>
- Selinus, O. (2004). Medical geology: An emerging speciality. *Terrae*, 1(1), A1–A8.
- Selinus, O., Alloway, B., Centeno, J. A., Finkelman, R. B., Fuge, R., Lindh, U., & Smedley, P. (Eds.). (2005). *Essentials of medical geology*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Academic Press.
- Selinus, O., Fuge, R., Alloway, B., Lindh, U., Centeno, J. A., Smedley, P., & Finkelman, R. B. (Eds.). (2013). *Essentials of medical geology* (Revised ed.). Dordrecht, Netherlands: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4375-5>
- Sharma, S., Sharma, S., Likhita, J., Rana, V. S., Kumar, A., Kumar, R., Thakur, S., & Sharma, N. (2025). Geogenic contaminants in groundwater: Impacts on

- irrigated fruit orchard health. *Water*, 17(17), 2534. <https://doi.org/10.3390/w17172534>
- Smedley, P. L., & Kinniburgh, D. G. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17(5), 517–568. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00018-5)
- Şengör, A. M. C., Özeren, S., Keskin, M., Sakıncı, M., Özbakır, A. D., & Kayan, İ. (2005). The Anatolian block: Tectonic evolution and geodynamic significance. *Geological Society of America Bulletin*, 117(7–8), 897–914. <https://doi.org/10.1130/B25698.1>
- Taylor, R. G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., van Beek, R., Wada, Y., & Treidel, H. (2013). Groundwater and climate change. *Nature Climate Change*, 3, 322–329. <https://doi.org/10.1038/nclimate1744>
- Türkeş, M. (2010). *Klimatoloji ve meteoroloji*. Ankara, Türkiye: Kriter Yayınevi.
- Türkeş, M. (2012). Türkiye’de gözlenen ve öngörülen iklim değişikliği, kuraklık ve çölleşme. *Ankara Üniversitesi Çevrebilimleri Dergisi*, 4(2), 1–32. https://doi.org/10.1501/Csaum_00000000063
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2015). *Sendai framework for disaster risk reduction 2015–2030*. Geneva, Switzerland: UNDRR.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2019). *Global assessment report on disaster risk reduction*. Geneva, Switzerland: UNDRR.
- Uzelli, T., Şener, M. F., Dölek, İ., Baba, A., Sözbilir, H., & Dirik, R. K. (2021). Structural controls and hydrogeochemical properties of geothermal fields in the Varto region, East Anatolia. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 30(9), 1076–1095. <https://doi.org/10.3906/yer-2106-13>
- Wang, C.-Y., & Manga, M. (2010). Hydrologic responses to earthquakes and a general metric. *Geofluids*, 10(3), 206–216. <https://doi.org/10.1111/j.1468-8123.2009.00270.x>
- World Health Organization. (2013). *Health effects of particulate matter*. Copenhagen, Denmark: WHO Regional Office for Europe.
- World Health Organization. (2017). *Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition, first addendum*. Geneva, Switzerland: World Health Organization.



BÖLÜM 7

Yüzey Sularında Mikrokirleticilerin Kaynakları, Çevresel Davranışı ve Olası Etkileri

Simge Varol¹ & Mehmet Ulusoy²

1. GİRİŞ VE KAVRAMSAL ÇERÇEVE

1.1. Mikrokirleticiler Kavramı ve Ortaya Çıkışı

Su kaynaklarının kalitesi üzerinde etkili olan kimyasal kirleticiler arasında mikrokirleticiler, son yıllarda çevre bilimleri ve su kaynakları yönetimi alanlarında giderek artan bir araştırma konusu haline gelmiştir. Mikrokirleticiler genellikle ng/L ile µg/L düzeylerinde bulunan ve çevresel ortamlarda düşük konsantrasyonlarda tespit edilen kimyasal bileşikler olarak tanımlanmaktadır (Schwarzenbach ve diğ., 2006; Richardson ve Ternes, 2018). Düşük konsantrasyonlarda bulunmalarına rağmen bu maddeler, kalıcılık özellikleri, biyobirikim potansiyelleri ve sucul organizmalar üzerindeki potansiyel toksik etkileri nedeniyle sucul ekosistemler açısından önemli çevresel riskler oluşturmaktadır (Pal ve diğ., 2010; Stuart ve diğ., 2012).

Mikrokirleticiler geniş bir kimyasal bileşik grubunu kapsamakta olup farmasötik maddeler, kişisel bakım ürünleri, endokrin bozucu kimyasallar, pestisitler, endüstriyel katkı maddeleri ve çeşitli sentetik organik bileşikler bu gruba dahil edilmektedir (Daughton ve Ternes, 1999; Lapworth ve diğ., 2012). Bu maddelerin önemli bir kısmı günlük yaşamda yaygın olarak kullanılan ürünlerden kaynaklanmakta ve kullanım sonrasında atıksu sistemleri aracılığıyla çevresel ortamlara ulaşabilmektedir.

Geleneksel su kalitesi izleme çalışmalarında uzun süre dikkate alınmayan bu bileşikler, gelişen analitik yöntemler sayesinde son yıllarda çevresel ortamlarda yaygın olarak tespit edilmeye başlanmıştır. Bu nedenle söz konusu kirleticiler literatürde sıklıkla “yeni ortaya çıkan kirleticiler (emerging contaminants)” olarak da adlandırılmaktadır (Richardson ve Kimura, 2016). Bu gelişmeler, su kaynaklarında düşük konsantrasyonlarda bulunan ancak potansiyel ekotoksikolojik etkileri yüksek olan bu kirleticilerin çevresel davranışlarının ve etkilerinin daha ayrıntılı olarak araştırılmasını gerekli kılmıştır.

¹ Prof. Dr., Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta/Turkey, ORCID: 0000-0002-1905-9454

² Dr., Antalya Su ve Atıksu İdaresi Genel Müdürlüğü, Havza Yönetim ve İzleme Şube Müdürlüğü, Antalya/Turkey, ORCID: 0000-0002-4445-2864

1.2. Yüzey Sularının Mikrokirleticiler Açısından Önemi

Nehirler, göller, rezervuarlar ve diğer yüzey suyu sistemleri hem doğal ekosistemler hem de insan faaliyetleri açısından büyük öneme sahiptir. Yüzey suları içme suyu temini, tarımsal sulama, endüstriyel kullanım ve rekreasyon gibi çok sayıda amaç için kullanılan temel su kaynaklarını oluşturmaktadır. Bunun yanı sıra bu su ortamları çok sayıda sucul organizma için yaşam alanı sağlayarak ekosistem işleyişinde kritik bir rol oynamaktadır (Allan ve Castillo, 2007).

Ancak artan nüfus, kentleşme, endüstriyel faaliyetler ve yoğun tarımsal uygulamalar sonucunda yüzey suyu sistemleri çok sayıda kirleticiye maruz kalmaktadır. Özellikle atıksu arıtma tesislerinden kaynaklanan deşarjlar, tarımsal drenaj, kentsel yüzey akışı ve atmosferik birikim gibi farklı kaynaklar mikrokirleticilerin yüzey sularına ulaşmasında önemli rol oynamaktadır (Kolpin ve diğ., 2002; Loos ve diğ., 2013).

Yüzey sularında bulunan mikrokirleticiler yalnızca bu ortamlarda sınırlı kalmamakta, çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçler sonucunda sedimanlara bağlanabilmekte, biyolojik sistemlerde birikebilmekte veya hidrolik bağlantılar aracılığıyla yeraltı suyu sistemlerine taşınabilmektedir (Lapworth ve diğ., 2012). Bu nedenle mikrokirleticilerin yüzey suyu sistemlerindeki davranışının anlaşılması, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi açısından büyük önem taşımaktadır.

1.3. Yüzey Suyu-Yeraltı Suyu Sürekliliği ve Kavramsal Yaklaşım

Yüzey suyu ve yeraltı suyu sistemleri hidrolojik döngünün birbirine bağlı iki temel bileşenini oluşturmaktadır. Bu iki sistem arasında gerçekleşen hidrolik etkileşimler suyun ve çözünmüş maddelerin bir ortamdan diğerine taşınmasına olanak sağlamaktadır. Özellikle nehir-akifer etkileşimlerinin gerçekleştiği hiporeik zon bölgeleri, yüzey suyu ile yeraltı suyu arasındaki madde taşınımının önemli geçiş alanlarını oluşturmaktadır (Boulton ve diğ., 1998; Sophocleous, 2002).

Mikrokirleticiler yüzey suyu sistemlerine ulaştıktan sonra yalnızca su kolonunda kalmamakta, sedimanlarla etkileşime girebilmekte, biyolojik süreçlerle dönüşüme uğrayabilmekte veya infiltrasyon süreçleri aracılığıyla yeraltı suyu sistemlerine taşınabilmektedir (Lapworth ve diğ., 2012; Stuart ve diğ., 2012). Bu durum mikrokirleticilerin çevresel ortamlardaki davranışının yalnızca yüzey suyu sistemleri ile sınırlı olarak değerlendirilmesinin yeterli olmadığını göstermektedir.

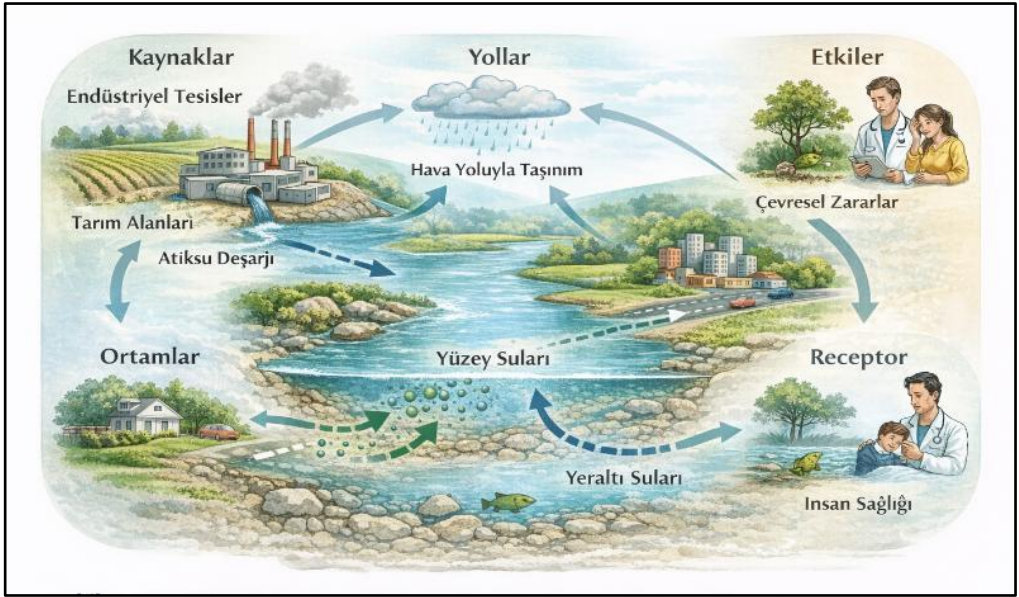
Bu nedenle mikrokirleticilerin çevresel kaderinin anlaşılabilmesi için yüzey suyu ve yeraltı suyu sistemlerinin birlikte ele alındığı bütüncül bir yaklaşımın

benimsenmesi gerekmektedir. Bu yaklaşım, kirlenici kaynakları, taşıyım yolları ve alıcı ortamlar arasındaki ilişkilerin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

1.4. Bölümün Amacı, Kapsamı ve Yapısı

Bu bölümün amacı, yüzey sularında bulunan mikrokirlenitcilerin başlıca kaynaklarının, çevresel ortamlardaki davranışlarının ve potansiyel etkilerinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesidir. Bu kapsamda mikrokirlenitcilerin yüzey suyu sistemlerine giriş yolları, başlıca mikrokirlenitci grupları, sucul ortamlardaki çevresel davranışları ve yüzey suyu–yeraltı suyu etkileşimi çerçevesinde taşıyım süreçleri ele alınmaktadır (Şekil 1).

Bölümün ilerleyen kısımlarında mikrokirlenitcilerin sucul ekosistemler ve insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkileri değerlendirilmekte, ayrıca bu kirlenitcilerin gideriminde kullanılan arıtma teknolojileri ve mevcut mevzuat çerçevesinde yönetim yaklaşımları tartışılmaktadır. Son olarak, mikrokirlenitcilerin su kaynakları yönetimi açısından oluşturduğu riskler ve bu kirlenitcilerin kontrolüne yönelik gelecekteki araştırma ihtiyaçları ele alınmaktadır.



Şekil 1 Mikrokirlenitcilerin çevresel döngüsü: kaynak-taşıyım yolu-çevresel ortam-alıcı (source-pathway-receptor) modeli kapsamında kavramsal gösterim (Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.)

2. YÜZEY SULARINDA MİKROKİRLETİCİ KAYNAKLARI

Yüzey sularında tespit edilen mikrokirleticilerin çevresel kökenleri, büyük ölçüde insan faaliyetleriyle ilişkilidir. Bu bileşiklerin sucul ortamlara ulaşması; noktasal ve yayılı kaynaklardan gerçekleşen girdiler ile hidrolojik süreçlerin birlikte etkisi sonucu meydana gelmektedir (**Tablo 1**). Literatürde mikrokirletici kaynakları genellikle noktasal (point sources) ve yayılı (non-point sources) olmak üzere iki ana grupta ele alınmakta; bu kaynaklardan yüzey sularına ulaşan bileşiklerin taşınımı ve dağılımı ise hidrodinamik ve çevresel koşullara bağlı olarak şekillenmektedir (Jiang ve diğ., 2013; Luo ve diğ., 2014).

Tablo 1. Yüzey sularında tespit edilen başlıca mikrokirletici kaynakları ve örnek bileşikler

Kaynak	Örnek Kirleticiler	Ortama Giriş Mekanizması
Atıksu arıtma tesisleri	Farmasötikler	Deşarj
Tarımsal faaliyetler	Pestisitler	Yüzey akışı
Endüstriyel faaliyetler	Fenoller	Deşarj
Atmosferik birikim	PAH	Yağış

2.1. Noktasal Kaynaklar

Noktasal kaynaklar, mikrokirleticilerin yüzey sularına girişinde en iyi tanımlanabilen ve en yoğun girdilerin gerçekleştiği kaynak türünü oluşturmaktadır. Bu kapsamda atıksu arıtma tesisleri (AAT'ler), mikrokirleticiler açısından başlıca noktasal kaynaklar olarak kabul edilmektedir. Evsel, hastane ve endüstriyel atıksuların büyük bölümü AAT'lerde arıtıldıktan sonra nehirler, göller ve rezervuarlar gibi yüzey sularına deşarj edilmektedir. Ancak konvansiyonel arıtma prosesleri, mikrokirleticilerin giderimi için özel olarak tasarlanmadığından, bu bileşiklerin önemli bir kısmı arıtma sonrasında da çıkış sularında bulunabilmektedir (Luo ve diğ., 2014; Kim & Zoh, 2016).

Özellikle farmasötik maddeler, kişisel bakım ürünleri ve endokrin bozucu kimyasallar, AAT çıkış sularında yaygın olarak tespit edilen mikrokirletici grupları arasında yer almaktadır. Bu bileşikler çoğunlukla biyolojik arıtma süreçlerine karşı dirençli olup, orijinal formlarıyla ya da biyotransformasyon ürünleri halinde yüzey sularına ulaşabilmektedir (Heberer, 2002). Hastanelerden kaynaklanan atıksular ise antibiyotikler, kontrast maddeleri ve sitotoksik bileşikler açısından önemli noktasal girdiler oluşturmaktadır. Bu tür atıksuların, evsel atıksularla birlikte arıtılması, yüzey sularındaki mikrokirletici çeşitliliğini ve konsantrasyonlarını artırabilmektedir (Verlicchi ve diğ., 2012).

Endüstriyel deşarjlar da mikrokirleticiler açısından önemli noktasal kaynaklar arasında yer almaktadır. Kimya, ilaç, tekstil ve plastik endüstrileri; üretim süreçlerinde kullanılan katkı maddeleri, çözücüler ve ara ürünler yoluyla yüzey

sularına çeşitli mikrokirleticilerin girişine neden olabilmektedir. Endüstriyel kaynaklı mikrokirleticiler, genellikle daha yüksek konsantrasyonlarda ve sınırlı sayıda deşarj noktası üzerinden yüzey sularına ulaşmakta; bu durum, alıcı ortamda lokal fakat yoğun kirlilik bölgelerinin oluşmasına yol açmaktadır (Ebele ve diğ., 2017).

2.2. Yayılı Kaynaklar

Yayılı kaynaklar, mikrokirleticilerin yüzey sularına girişinde daha geniş alanları kapsayan, zamansal ve mekânsal olarak değişken girdilerle karakterize edilmektedir. Tarımsal faaliyetler, bu bağlamda en önemli yayılı mikrokirletici kaynaklarından biridir. Tarımda kullanılan pestisitler, herbisitler, fungusitler ve veterinerlik ilaçları; sulama ve yağışlar sonrasında yüzey akışı ve drenaj yoluyla nehir ve göllere taşınabilmektedir. Özellikle hayvancılığın yoğun olduğu bölgelerde, doğal ve sentetik hormonlar ile antibiyotiklerin yüzey sularında tespit edilmesi, tarımsal yayılı kaynakların önemini ortaya koymaktadır (Wang ve diğ., 2017; Lapworth ve diğ., 2012).

Kentsel yüzey akışı da mikrokirleticiler açısından önemli bir yayılı kaynak oluşturmaktadır. Yerleşim alanlarında kullanılan kişisel bakım ürünleri, temizlik maddeleri, plastik katkıları ve yanma ürünleri; yağış olayları sırasında yollar, çatılar ve diğer geçirimsiz yüzeyler üzerinden yüzey sularına taşınmaktadır. Bu süreçte mikrokirleticiler, askıda katı maddelerle birlikte taşınarak sucul ortamlarda birikim gösterebilmektedir (Jiang ve diğ., 2013).

Atmosferik birikim ise çoğu zaman göz ardı edilen ancak özellikle yarı uçucu organik bileşikler açısından önemli bir yayılı kaynak olarak değerlendirilmektedir. Pestisitler, poliaromatik hidrokarbonlar ve bazı endüstriyel kimyasallar; atmosferde taşındıktan sonra yağış ve kuru çökeltme yoluyla yüzey sularına ulaşabilmektedir. Bu mekanizma, mikrokirleticilerin yalnızca yerel değil, bölgesel ve hatta küresel ölçekte taşınabildiğini göstermektedir (Sousa ve diğ., 2018).

2.3. Mikrokirleticilerin Yüzey Sularına Giriş Dinamikleri

Mikrokirleticilerin yüzey sularına ulaşması, yalnızca kaynak türüne değil, aynı zamanda hidrolojik ve çevresel süreçlere de bağlıdır. Yağış rejimi, akış hızı, su seviyesi değişimleri ve mevsimsel koşullar, mikrokirletici girişinin zamansal ve mekânsal dağılımını belirleyen temel faktörler arasında yer almaktadır. Özellikle yağışlı dönemlerde artan yüzey akışı, yayılı kaynaklardan yüzey sularına taşınan mikrokirletici yükünü önemli ölçüde artırabilmektedir (Luo ve diğ., 2014).

Yüzey sularına giren mikrokirleticiler, çözünmüş fazda taşınabildikleri gibi askıda katı maddeler ve sedimanlara adsorbe olarak da sucul ortama dahil

olabilmektedir. Bu durum, mikrokirleticilerin yalnızca su kolonunda değil, sedimanlarda da birikmesine ve daha uzun süreli çevresel kalıcılık göstermesine neden olmaktadır (Caliman & Gavrilescu, 2009). Sediman-su etkileşimi, özellikle yüzey suyu–yeraltı suyu geçiş zonlarında mikrokirleticilerin taşınımı açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Nehir-akifer etkileşiminin güçlü olduğu alanlarda, yüzey sularına ulaşan mikrokirleticilerin infiltrasyon ve hiporeik zon süreçleri aracılığıyla yeraltı sularına geçebildiği bilinmektedir. Bu bağlamda yüzey sularına gerçekleşen mikrokirletici girdileri, yalnızca yüzeysel ekosistemleri değil, aynı zamanda yeraltı sularını ve dolaylı olarak içme suyu kaynaklarını da etkileyebilecek bir potansiyele sahiptir (Lapworth ve diğ., 2012; Vulliet & Cren-Olivé, 2011). Bu nedenle mikrokirleticilerin yüzey sularına giriş dinamiklerinin anlaşılması, yüzey ve yeraltı sularının birlikte yönetilmesi açısından temel bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir.

3. BAŞLICA MİKROKİRLETİCİ GRUPLARI

Yüzey sularında tespit edilen mikrokirleticiler, kimyasal yapı, kullanım alanı, çevresel kalıcılık ve biyolojik etki potansiyellerine göre farklı gruplar altında değerlendirilmektedir. Bu gruptandırma, mikrokirleticilerin çevresel davranışlarının, taşınım mekanizmalarının ve ekotoksikolojik etkilerinin anlaşılması açısından temel bir çerçeve sunmaktadır. Literatürde en yaygın kabul gören sınıflandırma; farmasötik maddeler ve kişisel bakım ürünleri, endokrin bozucu kimyasallar, kalıcı organik kirleticiler, metaller ve metaloidler ile yeni ve gelişen mikrokirleticiler şeklindedir (Richardson & Kimura, 2017) (**Tablo 2; Şekil 2**).

Tablo 2. Yüzey sularında yaygın olarak tespit edilen mikrokirletici grupları

Kirletici grubu	Örnek bileşik	Kaynak
Farmasötikler	İbuprofen	Evsel atıksu
Endokrin bozucular	Bisfenol A	Plastik
Kalıcı organikler	PCB	Endüstri
Metaller	Hg, Cd	Madencilik



Şekil 2. Yüzey sularında yaygın olarak karşılaşılan başlıca mikrokirletici gruplarının kavramsal sınıflandırılması (Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.)

3.1. Farmasötik Maddeler ve Kişisel Bakım Ürünleri

Farmasötik maddeler ve kişisel bakım ürünleri (İKBÜ'ler), yüzey sularında en yaygın tespit edilen mikrokirletici gruplarından birini oluşturmaktadır. Bu bileşikler; analjezikler, antibiyotikler, antiepileptikler, antidepresanlar, beta-blokerler, UV filtreleri, parfüm bileşenleri ve antiseptikler gibi çok geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir. Farmasötiklerin büyük bir kısmı metabolik olarak tamamen parçalanmadan vücuttan atılmakta ve kanalizasyon sistemleri aracılığıyla atıksu arıtma tesislerine ulaşmaktadır (aus der Beek ve diğ., 2016).

Konvansiyonel atıksu arıtma prosesleri, İKBÜ'lerin giderimi açısından sınırlı etkinliğe sahiptir. Bu nedenle söz konusu bileşikler, yüzey sularında ng/L-µg/L düzeylerinde yaygın olarak tespit edilmektedir. Yapılan izleme çalışmalarında, diklofenak, ibuprofen, karbamazepin ve kafein gibi bileşiklerin nehir ve göl sularında sürekli olarak bulunduğu rapor edilmiştir (Archer ve diğ., 2017). Kişisel bakım ürünleri içerisinde yer alan triklosan ve sentetik musk bileşikleri ise sedimanlara adsorbe olma eğilimleri nedeniyle yüzey sularında uzun süreli kalıcılık gösterebilmektedir.

İKBÜ'lerin çevresel önemi, akut toksisitelerinden ziyade kronik maruziyet sonucu ortaya çıkan etkilerle ilişkilidir. Düşük konsantrasyonlarda dahi, sucul organizmalarda davranış değişiklikleri, üreme bozuklukları ve fizyolojik stres yanıtları oluşturabildikleri çeşitli çalışmalarda ortaya konmuştur (Fent ve diğ., 2006).

3.2. Endokrin Bozucu Kimyasallar

Endokrin bozucu kimyasallar (EBK'lar), canlı organizmalarda hormon sisteminin doğal işleyişine müdahale edebilen bileşikler olarak tanımlanmaktadır. Bu bileşikler; doğal ve sentetik steroid hormonlar, bisfenoller, ftalatlar, bazı pestisitler ve endüstriyel katkı maddelerini kapsamaktadır. Yüzey sularında tespit edilen EBK'ların önemli bir bölümü evsel ve endüstriyel atıksu deşarjları ile ilişkilidir (Bergman ve diğ., 2013).

EBK'ların çevresel etkileri, çoğunlukla çok düşük konsantrasyonlarda dahi biyolojik yanıt oluşturabilmeleri nedeniyle dikkat çekmektedir. Özellikle östrojenik aktiviteye sahip bileşiklerin, balıklarda vitellogenin sentezini tetiklediği ve üreme sisteminde yapısal değişikliklere yol açtığı literatürde güçlü biçimde belgelenmiştir (Jobling ve diğ., 2006). Yüzey sularında tespit edilen bu tür bileşiklerin, sedimanlar ve biyota ile etkileşimi sonucunda biyobirikim potansiyeli de artabilmektedir.

Endokrin bozucu kimyasalların yüzey sularındaki varlığı, yalnızca ekosistem sağlığı açısından değil, aynı zamanda içme suyu kaynakları açısından da önem taşımaktadır. Uzun vadeli ve düşük dozlu maruziyetlerin insan sağlığı üzerindeki etkileri henüz tam olarak ortaya konulamamış olmakla birlikte, bu belirsizlik durumu EBK'ların risk yönetiminde ihtiyatlı yaklaşımın benimsenmesini gerekli kılmaktadır (Diamanti-Kandarakis ve diğ., 2009).

3.3. Kalıcı Organik Kirleticiler

Kalıcı organik kirleticiler (KOK'lar), çevrede uzun süre bozunmadan kalabilen, biyobirikim ve biyomagnifikasyon potansiyeline sahip toksik bileşiklerdir. Bu grup içerisinde poliklorlu bifeniller (PCB'ler), dioksinler ve bazı organoklorlu pestisitler yer almaktadır. Her ne kadar bu bileşiklerin kullanımı birçok ülkede yasaklanmış veya sınırlandırılmış olsa da geçmişteki yaygın kullanımları nedeniyle yüzey sularında hâlen tespit edilebilmektedir (Jones & de Voogt, 1999).

KOK'lar genellikle hidrofobik özellikleri nedeniyle su kolonundan ziyade sedimanlarda ve askıda katı maddelerde birikme eğilimi göstermektedir. Bu durum, yüzey sularında KOK kaynaklı kirliliğin uzun vadeli ve yerel ölçekte yoğunlaşmasına neden olmaktadır. Sedimanların yeniden süspansiyona uğradığı

taşkın ve yüksek debili akış koşullarında, bu bileşiklerin su kolonuna geri salınabildiği bilinmektedir (Lohmann ve diğ., 2007).

Yüzey sularındaki KOK varlığı, gıda zinciri yoluyla üst trofik seviyelere taşınarak ekosistem ve insan sağlığı açısından önemli riskler oluşturmaktadır. Bu nedenle KOK'lar, uluslararası sözleşmeler ve izleme programları kapsamında öncelikli kirleticiler arasında değerlendirilmektedir.

3.4. Metaller ve Metaloidler

Metaller ve metaloidler, klasik kirleticiler olarak tanımlanmakla birlikte, düşük konsantrasyonlarda dahi toksik etki gösterebilmeleri nedeniyle mikrokirletici perspektifiyle de ele alınmaktadır. Arsenik, cıva, kadmiyum ve kurşun gibi elementler, doğal jeolojik süreçlerin yanı sıra madencilik, endüstri ve tarımsal faaliyetler sonucu yüzey sularına ulaşabilmektedir (Alloway, 2013).

Bu elementlerin çevresel davranışı, büyük ölçüde pH, redoks koşulları ve organik madde içeriği gibi çevresel faktörlere bağlıdır. Metaller ve metaloidler, yüzey sularında çözünmüş fazda bulunabildikleri gibi sedimanlara bağlanarak uzun süreli kalıcılık da gösterebilmektedir. Özellikle yüzey suyu–yeraltı suyu etkileşim zonlarında, bu elementlerin mobilitesi artabilmekte ve yeraltı sularına taşınma potansiyeli ortaya çıkabilmektedir (Smedley & Kinniburgh, 2002).

3.5. Yeni ve Gelişen Mikrokirleticiler

Son yıllarda analitik tekniklerdeki gelişmeler, daha önce tespit edilemeyen veya çevresel önemi yeterince bilinmeyen yeni mikrokirletici gruplarının tanımlanmasına olanak sağlamıştır. Bu kapsamda per- ve polifloroalkil maddeler (PFAS), mikroplastikler ve bu partiküller üzerine adsorbe olmuş kimyasal bileşikler ön plana çıkmaktadır (Giesy & Kannan, 2001; Li ve diğ., 2020).

PFAS bileşikleri, yüksek kimyasal kararlılıkları nedeniyle yüzey sularında uzun süre kalabilmekte ve uzak mesafelere taşınabilmektedir. Mikroplastikler ise yalnızca fiziksel kirleticiler olarak değil, aynı zamanda diğer mikrokirleticiler için taşıyıcı ortam oluşturarak karmaşık maruziyet senaryolarına neden olmaktadır. Bu durum, yüzey sularında mikrokirleticilerin çevresel kaderinin daha da karmaşık hale gelmesine yol açmaktadır.

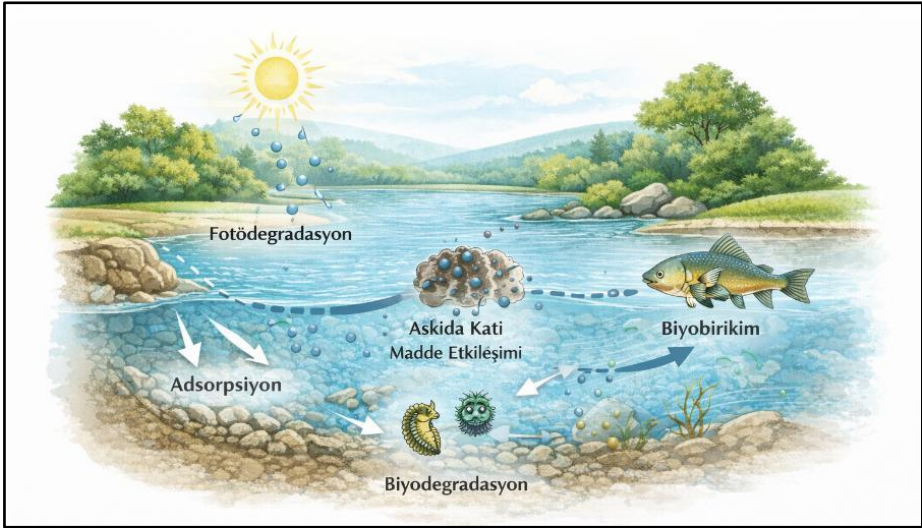
Yeni ve gelişen mikrokirleticiler, mevcut mevzuat ve izleme programlarının büyük ölçüde dışında kalmakta olup, bu bileşiklerin çevresel ve toksikolojik etkilerine ilişkin bilgi boşlukları hâlen önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır.

4. MİKROKİRLETİCİLERİN ÇEVRESEL DAVRANIŞI

Mikrokirleticilerin yüzey sularındaki çevresel davranışı ve kaderi, bu bileşiklerin sucul ekosistemlerdeki kalıcılığını, taşınımını ve potansiyel etkilerini belirleyen temel süreçleri kapsamaktadır. Mikrokirleticiler, su ortamına girdikten sonra yalnızca çözülmüş fazda bulunmamakta; fizikokimyasal, biyolojik ve hidrolojik süreçlerin etkisiyle farklı çevresel bileşenler arasında dağılmakta ve dönüşüme uğramaktadır (**Tablo 3**). Bu süreçlerin anlaşılması, yüzey sularındaki mikrokirletici yükünün ve bunun yeraltı sularına olası yansımalarının değerlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir (Schwarzenbach ve diğ., 2010) (**Şekil 3**).

Tablo 3. Mikrokirleticilerin çevresel ortamlardaki başlıca taşınım ve dönüşüm süreçleri

Süreç	Tanım
Adsorpsiyon	Sedimana bağlanma
Fotodegradasyon	Güneş ışığı ile parçalanma
Biyodegradasyon	Mikroorganizmalar tarafından parçalanma
Hidroliz	Kimyasal parçalanma



Şekil 3. Yüzey sularında mikrokirleticilerin çevresel kaderi ve başlıca dönüşüm süreçlerinin kavramsal gösterimi (Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.)

4.1. Yüzey Sularında Fizikokimyasal ve Biyolojik Süreçler

Yüzey sularında bulunan mikrokirleticilerin çevresel kaderi, öncelikle fizikokimyasal özellikleri tarafından kontrol edilmektedir. Suda çözünürlük, uçuculuk, oktanol–su dağılım katsayısı ($\log K_{ow}$) ve asit ayrışma sabiti (pK_a) gibi

parametreler, mikrokirleticilerin su kolonunda çözünmüş fazda mı kalacağını yoksa partikül fazına mı geçeceğini belirleyen temel faktörlerdir (Schwarzenbach ve diğ., 2010).

Fotokimyasal süreçler, özellikle sıg ve güneş ışığına maruz kalan yüzey sularında mikrokirleticilerin dönüşümünde önemli bir rol oynamaktadır. Doğrudan fotoliz veya dolaylı fotokimyasal reaksiyonlar yoluyla bazı farmasötik maddeler ve pestisitler parçalanabilmektedir. Ancak bu dönüşüm süreçleri her zaman zararsız son ürünlerle sonuçlanmamakta; kimi durumlarda ana bileşikten daha toksik veya daha kalıcı ara ürünler oluşabilmektedir (Khetan & Collins, 2007).

Biyolojik bozunma, mikrokirleticilerin çevresel kaderinde bir diğ er önemli mekanizmadır. Mikroorganizmalar tarafından gerçekleştirilen biyotransformasyon süreçleri, özellikle biyolojik olarak parçalanabilir bileşikler için yüzey sularındaki kalıcılığı azaltabilmektedir. Bununla birlikte, birçok mikrokirletici biyolojik arıtma ve doğal biyodegradasyon süreçlerine karşı direnç gösterebilmekte ve bu durum yüzey sularında uzun süreli varlıklarını sürdürmelerine neden olmaktadır (Tran ve diğ., 2018).

4.2. Sediman ve Askıda Katı Madde ile Etkileşim

Mikrokirleticilerin çevresel kaderinde sediman ve askıda katı maddelerle olan etkileşimleri belirleyici bir rol oynamaktadır. Hidrofobik özellik gösteren birçok mikrokirletici, su kolonundan askıda katı maddelere ve sedimanlara adsorbe olma eğilimindedir. Bu süreç, yüzey sularındaki mikrokirleticilerin geçici olarak sudan uzaklaştırılmasına neden olurken, sedimanları uzun vadeli kirletici depoları haline getirebilmektedir (Burkhard, 2000).

Sedimanlarda biriken mikrokirleticiler, çevresel koşullardaki değişimlere bağlı olarak yeniden su kolonuna salınabilmektedir. Akış hızındaki artış, sedimanların yeniden askıya kalkması veya redoks koşullarındaki değişimler, sediman kaynaklı ikincil kirlilik süreçlerini tetikleyebilmektedir. Bu durum, yüzey sularında mikrokirletici konsantrasyonlarının zaman içinde dalgalanmasına neden olmakta ve ekosistem üzerindeki kronik maruziyet riskini artırmaktadır (Eggleton & Thomas, 2004).

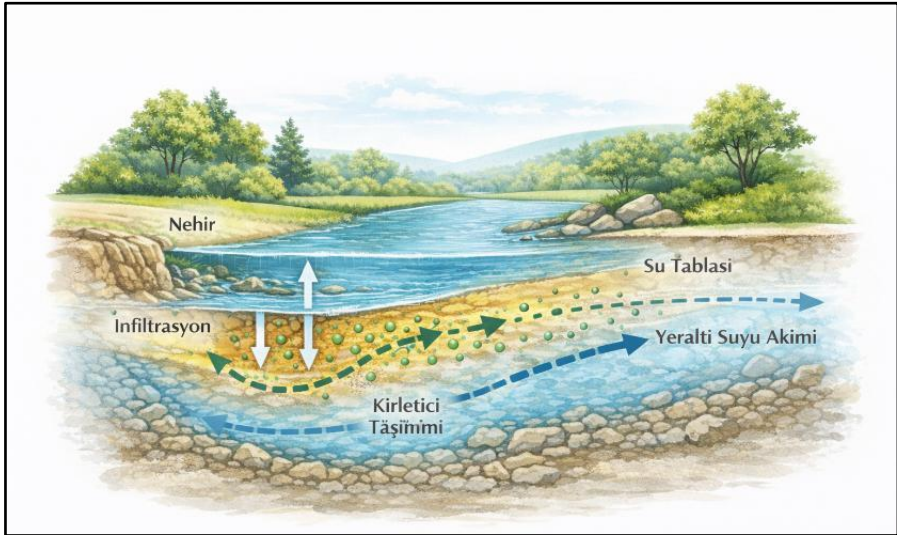
Sediman-su etkileşimi, aynı zamanda mikrokirleticilerin yüzey suyu-yeraltısu geçiş zonlarında taşınımı açısından da önem taşımaktadır. Özellikle nehir tabanı sedimanları, mikrokirleticilerin akiferlere geçişinde bir filtre veya geciktirici ortam olarak işlev görebilmektedir. Ancak sedimanların doygunluğa ulaşması veya çevresel koşulların değişmesi, bu koruyucu etkinin azalmasına yol açabilmektedir (Mendoza-Lera & Datry, 2017).

4.3. Yüzey Suyu-Yeraltısu Etkileşimi ve Mikrokirletici Taşınımı

Yüzey suları ile yeraltı suları arasındaki hidrolik etkileşim, mikrokirleticilerin çevresel kaderini belirleyen en kritik süreçlerden biridir. Nehir-akifer etkileşiminin yoğun olduğu bölgelerde, yüzey sularında bulunan mikrokirleticiler infiltrasyon yoluyla yeraltı sularına taşınabilmektedir. Bu taşınım süreci, özellikle hiporeik zon olarak adlandırılan yüzey suyu-yeraltı suyu geçiş alanlarında gerçekleşmektedir (Krause ve diğ., 2011) (**Şekil 4**).

Mikrokirleticilerin yeraltı sularına geçiş potansiyeli, bileşiklerin kimyasal özellikleri ile akifer ortamının hidrojeolojik özelliklerine bağlıdır. Düşük logKow değerine sahip, yüksek suda çözünürlüğü olan bileşikler, çözünmüş fazda taşınarak yeraltı sularına daha kolay ulaşabilmektedir. Buna karşılık hidrofobik bileşikler, sedimanlarda tutulma eğiliminde olup taşınım sırasında gecikme gösterebilmektedir (Lapworth ve diğ., 2012).

Yüzey sularındaki mikrokirletici kirliliğinin yeraltı sularına yansması, özellikle içme suyu temini açısından önemli riskler oluşturmaktadır. Yeraltı sularında suyun yenilenme süresinin uzun olması, mikrokirleticilerin düşük konsantrasyonlarda dahi uzun süreli kalıcılık göstermesine neden olabilmektedir. Bu nedenle yüzey sularındaki mikrokirletici yükünün kontrolü, yalnızca yüzeysel ekosistemlerin korunması açısından değil, yeraltı sularının sürdürülebilir yönetimi açısından da kritik bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir (Stuart ve diğ., 2012).



Şekil 4. Yüzey suyu-yeraltı suyu etkileşimi ve mikrokirleticilerin akifer sistemlerine taşınımının kavramsal gösterimi (Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.)

5. YÜZEY SULARI, YERALTISULARI VE İÇME SUYU BAĞLANTISI

Yüzey suları, yeraltısuları ve içme suyu kaynakları hidrolojik döngü içerisinde birbirleriyle sürekli etkileşim halindedir. Bu süreklilik, mikrokirleticilerin yalnızca tek bir su bileşeninde değerlendirilmesini yetersiz kılmakta; aksine yüzey suyu-yeraltısuyu-içme suyu sistemi bütüncül bir çerçevede ele alınmasını gerekli kılmaktadır. Yüzey sularında tespit edilen mikrokirleticiler, hidrolojik bağlantılar yoluyla yeraltısularına taşınabilmekte ve nihayetinde içme suyu temin sistemlerine kadar ulaşabilmektedir (UNESCO, 2018).

5.1. Hidrolojik Süreklilik ve Geçiş Mekanizmaları

Yüzey suları ile yeraltı suları arasındaki ilişki, temel olarak hidrolik gradyanlar ve akifer özellikleri tarafından kontrol edilmektedir. Nehirlerin yeraltı suyunu beslediği (losing streams) veya yeraltı suyunun yüzey sularına boşaldığı (gaining streams) sistemlerde, mikrokirleticilerin taşınım yönü ve hızı önemli ölçüde değişmektedir. Bu bağlamda yüzey suları, mikrokirleticilerin yeraltı sularına girişinde doğrudan bir kaynak işlevi görebilmektedir (Winter ve diğ., 1998).

Geçiş mekanizmaları arasında infiltrasyon, nehir tabanı sızması ve hiporeik zon süreçleri öne çıkmaktadır. Hiporeik zon, yüzey suyu ile yeraltı suyu arasında fiziksel, kimyasal ve biyolojik etkileşimlerin yoğun olarak gerçekleştiği bir ara yüz bölgesi olup, mikrokirleticilerin taşınımı ve dönüşümü açısından kritik bir rol oynamaktadır (Boano ve diğ., 2014). Bu bölgede gerçekleşen süreçler, bazı mikrokirleticilerin tutulmasına veya biyolojik olarak parçalanmasına olanak tanıırken, bazı bileşiklerin ise yeraltı sularına taşınmasını kolaylaştırabilmektedir.

5.2. Yeraltı Sularında Mikrokirleticilerin Dolaylı Varlığı

Yeraltı sularında tespit edilen mikrokirleticiler çoğu zaman doğrudan bir kirletici kaynaktan ziyade, yüzey sularındaki kirliliğin dolaylı bir yansıması olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle nehir-akifer etkileşiminin güçlü olduğu alüvyon akiferlerde, yüzey sularında bulunan farmasötik maddeler, pestisitler ve endokrin bozucu kimyasalların yeraltı sularında iz düzeylerinde tespit edildiği bildirilmektedir (Loos ve diğ., 2010).

Yeraltı sularında mikrokirleticilerin davranışı, yüzey sularına kıyasla daha yavaş ve uzun süreli süreçlerle karakterizedir. Düşük akış hızları ve sınırlı biyolojik aktivite, mikrokirleticilerin yeraltı ortamında daha uzun süre kalmasına neden olabilmektedir. Bu durum, yüzey sularında kısa süreli bir kirlenme olayının dahi yeraltı sularında uzun vadeli bir kalite bozulmasına yol açabileceğini göstermektedir (Banzhaf ve diğ., 2017).

Ayrıca yeraltı sularında mikrokirleticilerin tespiti, analitik zorluklar ve düşük konsantrasyonlar nedeniyle sınırlı sayıda çalışmada ele alınabilmektedir. Ancak son yıllarda gelişen analitik teknikler sayesinde, yeraltı sularında da çok sayıda mikrokirleticinin varlığı ortaya konulmuştur. Bu durum, yüzey sularındaki mikrokirletici yükünün yeraltı suları üzerindeki etkilerinin daha dikkatli değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Lapworth ve diğ., 2019).

5.3. İçme Suyu Kaynakları Açısından Riskler

Yüzey ve yeraltı suları arasındaki hidrolojik bağlantı, içme suyu kaynaklarının mikrokirleticiler açısından potansiyel risk altında olmasına neden olmaktadır. Birçok bölgede içme suyu temini, yüzey suları veya yüzey suyu ile beslenen yeraltı sularından sağlanmaktadır. Bu nedenle yüzey sularında bulunan mikrokirleticiler, içme suyu arıtma tesislerine kadar ulaşabilmektedir (WHO, 2017).

Konvansiyonel içme suyu arıtma prosesleri, patojenler ve klasik kirleticilerin giderimi için etkili olmakla birlikte, mikrokirleticilerin tamamının giderimi açısından sınırlı kalabilmektedir. Yapılan çalışmalar, bazı farmasötik maddeler ve endokrin bozucu kimyasalların içme suyu arıtımı sonrasında dahi ng/L düzeylerinde tespit edilebildiğini göstermektedir (Benotti ve diğ., 2009). Bu durum, içme suyu güvenliği açısından düşük doz-uzun süreli maruziyet risklerinin göz ardı edilmemesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Yeraltı sularının içme suyu kaynağı olarak kullanıldığı bölgelerde ise mikrokirleticilerin varlığı daha az görünür olmakla birlikte, risk potansiyeli daha uzun vadelidir. Akiferlerdeki su yenilenme süresinin uzun olması, mikrokirleticilerin sistemde uzun süre kalmasına ve gideriminin zorlaşmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle yüzey sularındaki mikrokirletici kontrolü, içme suyu kaynaklarının korunmasında önleyici bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir (Postigo & Barceló, 2015).

6. EKOLOJİK ETKİLER

Yüzey sularında tespit edilen mikrokirleticiler, düşük konsantrasyonlarda bulunmalarına rağmen sucul ekosistemler üzerinde önemli biyolojik etkiler oluşturabilmektedir. Bu bileşiklerin çevresel ortamlarda yaygın olarak bulunması, sucul organizmaların uzun süreli ve düşük dozlu kimyasal maruziyetlere sürekli olarak maruz kalmasına neden olmaktadır. Özellikle farmasötik maddeler, pestisitler ve endokrin bozucu kimyasallar gibi biyolojik olarak aktif bileşikler, sucul canlıların fizyolojik süreçlerini etkileyebilmekte ve ekosistem düzeyinde çeşitli bozulmalara yol açabilmektedir (Fent ve diğ., 2006) (Şekil 5).

Sucul organizmalar, yaşam döngülerinin tamamını veya büyük bir kısmını su ortamında geçirdikleri için mikrokirleticilere karşı en hassas biyolojik gruplar arasında yer almaktadır. Bu nedenle balıklar, kabuklular, bentik omurgasızlar ve algler gibi sucul organizmalar, mikrokirleticilerin ekotoksikolojik etkilerinin değerlendirilmesinde sıklıkla biyogösterge türler olarak kullanılmaktadır (Malaj ve diğ., 2014). Bu organizmalarda gözlenen fizyolojik ve davranışsal değişimler, mikrokirleticilerin ekosistem düzeyindeki etkilerini anlamada önemli ipuçları sağlamaktadır.

Mikrokirleticilerin ekolojik etkileri genellikle akut (kısa süreli) ve kronik (uzun süreli) maruziyet olmak üzere iki farklı düzeyde değerlendirilmektedir. Akut etkiler, yüksek konsantrasyonlara kısa süreli maruziyet sonucunda ortaya çıkan toksik etkileri ifade ederken; kronik etkiler daha düşük konsantrasyonlarda fakat uzun süreli maruziyet sonucunda meydana gelen fizyolojik, davranışsal veya üreme ile ilişkili değişimleri kapsamaktadır (Sumpter & Johnson, 2005). Özellikle kronik maruziyetin ekosistem düzeyinde daha belirgin sonuçlar doğurabildiği belirtilmektedir.

Bununla birlikte bazı mikrokirleticiler, hormon benzeri etkiler göstererek sucul organizmaların endokrin sistemlerini etkileyebilmekte ve üreme süreçlerinde önemli değişimlere yol açabilmektedir. Endokrin bozucu kimyasalların sucul ortamlarda varlığı, özellikle balık popülasyonlarında üreme başarısının azalması, cinsiyet oranlarında değişim ve gelişimsel bozukluklar gibi sonuçlarla ilişkilendirilmektedir (Kidd ve diğ., 2007). Bu tür etkiler yalnızca bireysel düzeyde değil, aynı zamanda popülasyon ve ekosistem düzeyinde de önemli sonuçlar doğurabilmektedir.

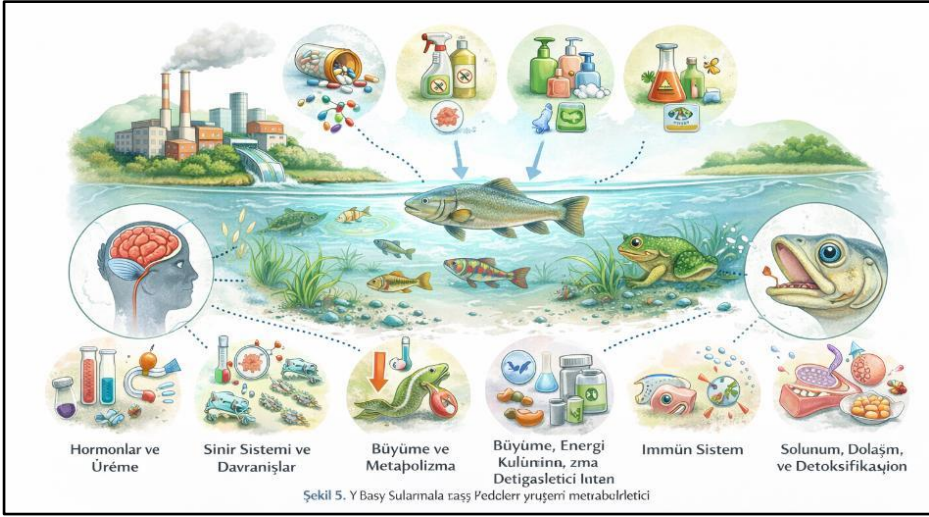
Bu bölümde, yüzey sularında bulunan mikrokirleticilerin sucul organizmalar üzerindeki ekolojik etkileri ele alınmakta; özellikle akut ve kronik toksisite mekanizmaları ile endokrin sistem üzerindeki etkiler güncel bilimsel çalışmalar ışığında değerlendirilmektedir.

6.1. Sucul Organizmalarda Akut ve Kronik Etkiler

Mikrokirleticilerin sucul organizmalar üzerindeki etkileri, maruziyet süresi ve kirletici konsantrasyonuna bağlı olarak akut ve kronik toksisite biçimlerinde değerlendirilmektedir. Akut toksisite genellikle kısa süreli ve nispeten yüksek konsantrasyonlu maruziyetlerde ortaya çıkan ölüm, immobilizasyon veya ciddi fizyolojik bozulmalar gibi etkileri kapsarken; kronik toksisite daha düşük konsantrasyonlarda fakat uzun süreli maruziyet sonucunda gelişen büyüme geriliği, davranış değişimleri, üreme başarısında azalma ve metabolik bozukluklar gibi etkileri içermektedir (Arnold ve diğ., 2014).

Sucul ekosistemlerde mikrokirleticilerin akut etkileri çoğu zaman laboratuvar temelli ekotoksikolojik testler aracılığıyla değerlendirilmektedir. Bu testlerde

balıklar (*Danio rerio*), kabuklular (*Daphnia magna*) ve algler gibi model organizmalar yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar, bazı farmasötik maddelerin ve pestisitlerin yüksek konsantrasyonlarda akut toksik etkiler gösterebildiğini ortaya koymuştur (Tablo 3). Örneğin bazı non-steroid antiinflamatuvar ilaçların ve insektisitlerin sucul omurgasızlarda immobilizasyon ve mortaliteye neden olabildiği bildirilmiştir (Brausch & Rand, 2011). Bununla birlikte doğal ortamlarda mikrokirleticilerin genellikle çok daha düşük konsantrasyonlarda bulunması nedeniyle akut toksisite etkilerinin saha koşullarında daha sınırlı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5. Yüzeysel sularda bulunan mikrokirleticilerin sucul organizmalar üzerindeki fizyolojik ve davranışsal etkilerinin kavramsal gösterimi. (Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.)

Buna karşın kronik etkiler, mikrokirleticilerin ekolojik risk değerlendirmesinde daha kritik bir rol oynamaktadır. Sucul organizmalar çoğu zaman çevresel ortamlarda bulunan mikrokirleticilere uzun süre boyunca maruz kalmaktadır. Bu durum, düşük konsantrasyonlarda dahi fizyolojik ve davranışsal değişimlere yol açabilmektedir. Özellikle bazı farmasötik maddelerin balıklarda davranışsal değişikliklere neden olduğu ve predatör-av ilişkilerini etkileyebildiği gösterilmiştir. Örneğin anksiyolitik etkili ilaçların balıklarda risk alma davranışını artırabildiği ve doğal davranış kalıplarını değiştirebildiği rapor edilmiştir (Brodin ve diğ., 2013).

Mikrokirleticilerin kronik etkileri yalnızca bireysel düzeyde kalmayıp popülasyon ve ekosistem düzeyinde de sonuçlar doğurabilmektedir. Uzun süreli maruziyet sonucunda büyüme hızının azalması, gelişimsel anormallikler ve

üreme başarısında düşüş gibi etkiler popülasyon dinamiklerini değiştirebilmekte ve ekosistem yapısını etkileyebilmektedir. Özellikle çok sayıda mikrokirleticinin birlikte bulunduğu çevresel ortamlarda karışım etkileri (mixture effects) önemli bir ekotoksikolojik problem olarak değerlendirilmektedir (Backhaus & Faust, 2012). Bu durumda tek bir bileşiğin düşük konsantrasyonlarda zararsız gibi görünmesine rağmen, birden fazla kimyasalın birlikte bulunması organizmalar üzerinde daha güçlü biyolojik etkiler oluşturabilmektedir.

Son yıllarda yapılan araştırmalar, mikrokirleticilerin yalnızca toksisite yoluyla değil aynı zamanda davranışsal ve fizyolojik mekanizmalar aracılığıyla da ekosistemleri etkileyebildiğini göstermektedir. Örneğin bazı kimyasal bileşiklerin balıkların beslenme davranışını, göç hareketlerini ve sosyal etkileşimlerini değiştirebildiği belirlenmiştir. Bu tür davranışsal değişimler, ekosistem içerisindeki trofik ilişkileri ve enerji akışını dolaylı olarak etkileyebilmektedir (Hellström ve diğ., 2016).

Bütün bu bulgular, mikrokirleticilerin sucul organizmalar üzerindeki etkilerinin yalnızca kısa süreli toksisite değerlendirmeleri ile sınırlı kalmaması gerektiğini göstermektedir. Uzun süreli kronik maruziyet, kimyasal karışımlar ve davranışsal etkiler gibi faktörlerin birlikte değerlendirilmesi, sucul ekosistemlerde mikrokirleticilerin gerçek çevresel risklerinin daha doğru anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.

Tablo 3. Yüzey sularında tespit edilen bazı mikrokirleticilerin sucul organizmalar üzerindeki akut ve kronik etkilerine ilişkin örnek bulgular.

Mikrokirletici Grubu	Örnek Bileşik	Test Organizması	Gözlenen Etkiler	Etki Türü	Kaynak
Farmasötikler	Fluoksetin	Balık (<i>Pimephales promelas</i>)	Davranış değişimleri, risk alma davranışı	Kronik	Brodin ve diğ., 2013
Pestisitler	Klorpirifos	<i>Daphnia magna</i>	Immobilizasyon, mortalite	Akut	Brausch & Rand, 2011
Non-steroid antiinflatuvarlar	Diklofenak	Balık	Solungaç ve böbrek hasarı	Kronik	Fent ve diğ., 2006
Antibiyotikler	Siprofloksasin	Algler	Fotosentez inhibisyonu	Kronik	Arnold ve diğ., 2014

6.2 Endokrin Bozucu Kimyasalların Sucul Organizmalarda Üreme Sistemine Etkileri

Endokrin bozucu kimyasallar (EBK), canlı organizmalarda hormon sisteminin işleyişini taklit eden, engelleyen veya değiştiren kimyasal bileşikler olarak tanımlanmaktadır. Bu bileşikler, doğal hormonların sentezini, taşınımını ve reseptör etkileşimlerini etkileyerek endokrin sistemin normal işleyişini bozabilmektedir (Diamanti-Kandarakis ve diğ., 2009). Su ortamlarında tespit edilen birçok mikrokirlетici bileşiğin endokrin bozucu özellik gösterebildiği bilinmektedir. Özellikle steroid hormonlar, bazı pestisitler, alkilfenoller, bisfenol A ve çeşitli farmasötik maddeler bu grupta yer almaktadır.

Sucul organizmalar, yaşam döngülerinin büyük bir bölümünü su ortamında geçirmeleri nedeniyle endokrin bozucu kimyasallara karşı oldukça hassas kabul edilmektedir. Bu bileşiklerin sucul ortamlarda çok düşük konsantrasyonlarda dahi biyolojik etkiler oluşturabildiği gösterilmiştir (**Tablo 4**). Özellikle balık türlerinde yapılan çalışmalar, östrojenik aktiviteye sahip bazı kimyasalların üreme sistemini doğrudan etkileyebildiğini ortaya koymuştur (Jobling ve diğ., 1998).

Endokrin bozucu kimyasalların en belirgin etkilerinden biri, erkek balıklarda dişiye özgü biyokimyasal süreçlerin tetiklenmesidir. Bu durum genellikle vitellogenin üretimi ile ilişkilendirilmektedir. Vitellogenin, normal koşullarda yalnızca dişi balıklarda yumurta gelişimi sırasında sentezlenen bir protein olup erkek balıklarda tespit edilmesi endokrin bozucu etkiye maruziyetin önemli bir biyogöstergesi olarak kabul edilmektedir (Sumpter & Jobling, 2013). Atıksu arıtma tesislerinden kaynaklanan östrojenik bileşiklerin bulunduğu nehirlerde yaşayan erkek balıklarda vitellogenin üretiminin önemli ölçüde arttığı çeşitli çalışmalarda rapor edilmiştir.

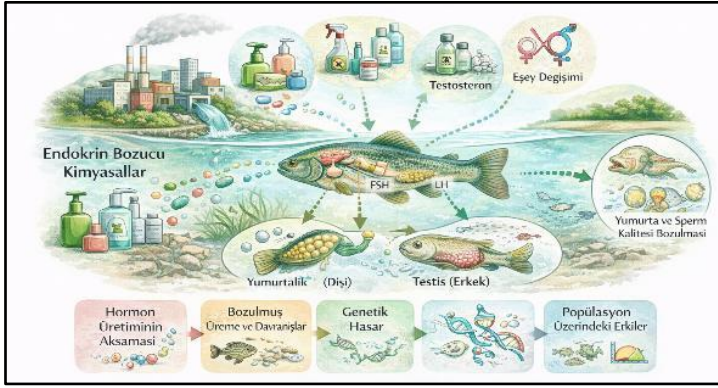
Endokrin bozucu kimyasalların uzun süreli maruziyet sonucunda ortaya çıkardığı bir diğer önemli etki ise interseks gelişimi olarak tanımlanan üreme anomalileridir. İnterseks durumunda erkek bireylerin gonad dokularında dişi üreme hücrelerinin geliştiği gözlemlenmektedir. Bu durumun özellikle atıksu deşarjlarının etkisinde kalan nehir sistemlerinde yaşayan balık popülasyonlarında yaygın olarak görüldüğü bildirilmiştir (Jobling ve diğ., 2006). İnterseks gelişimi, bireysel düzeyde üreme kapasitesini azaltabildiği gibi uzun vadede popülasyon dinamiklerini de etkileyebilmektedir.

Tablo 4. Sucul organizmalarda üreme sistemi üzerinde etkili olduğu bildirilen bazı endokrin bozucu kimyasallar ve gözlenen biyolojik etkiler.

Kimyasal	Kaynak	Etkilenen Organizma	Gözlenen Etki	Literatür
Ethinylestradiol	Atıksu arıtma deşarjları	Balık	Popülasyon azalması	Kidd ve diğ., 2007
Nonylphenol	Endüstriyel deşarj	Balık	Vitellogenin üretimi	Jobling ve diğ., 1998
Bisfenol A	Plastik katkıları	Balık	Gonad gelişim bozukluğu	Diamanti-Kandarakis ve diğ., 2009
Estradiol	Doğal hormon	Balık	Endokrin sistem bozukluğu	Sumpter & Jobling, 2013

Endokrin bozucu kimyasalların sucul organizmalar üzerindeki etkileri yalnızca bireysel fizyolojik değişimlerle sınırlı değildir. Bazı durumlarda popülasyon düzeyinde ciddi sonuçlar ortaya çıkabilmektedir. Kanada’da gerçekleştirilen bir göl ekosistemi deneyinde, sentetik bir östrojen olan etinilestradiol’ün çok düşük konsantrasyonlarda bile balık popülasyonlarında önemli düşüslere yol açtığı gösterilmiştir. Bu çalışmada birkaç yıl içerisinde balık popülasyonunun büyük ölçüde azaldığı ve ekosistem yapısının belirgin şekilde değiştiği rapor edilmiştir (Kidd ve diğ., 2007).

Bu tür bulgular, endokrin bozucu kimyasalların sucul ekosistemler üzerinde yalnızca bireysel düzeyde değil aynı zamanda popülasyon ve ekosistem düzeyinde etkiler oluşturabileceğini göstermektedir. Özellikle yüzey sularında sürekli olarak düşük konsantrasyonlarda bulunan bu bileşikler, kronik maruziyet yoluyla uzun vadeli ekolojik sonuçlar doğurabilmektedir. Bu nedenle endokrin bozucu kimyasalların çevresel ortamlardaki varlığı, su kalitesi yönetimi ve ekosistem koruma çalışmaları açısından önemli bir araştırma konusu olmaya devam etmektedir (Şekil 6).



Şekil 6. Endokrin bozucu kimyasalların sucul organizmalarda hormon sistemi ve üreme süreçleri üzerindeki etkisinin kavramsal gösterimi. (Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.)

7. İNSAN SAĞLIĞI BOYUTU

Yüzey sularında tespit edilen mikrokirleticiler yalnızca sucul ekosistemler açısından değil, aynı zamanda insan sağlığı açısından da önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Son yıllarda yapılan çalışmalar, çok sayıda farmasötik madde, endokrin bozucu kimyasal ve endüstriyel bileşiğin yüzey sularında ve bazı durumlarda içme suyu kaynaklarında düşük konsantrasyonlarda bulunabildiğini göstermektedir (Richardson & Ternes, 2018). Bu bileşiklerin çoğu nanogram veya mikrogram düzeylerinde tespit edilmesine rağmen, uzun süreli maruziyetin potansiyel sağlık etkileri konusunda bilimsel araştırmalar giderek artmaktadır.

Mikrokirleticiler insanlara farklı yollarla ulaşabilmektedir. En önemli maruziyet yolları arasında içme suyu tüketimi, gıda zinciri aracılığıyla biyobirikim ve rekreasyonel su kullanımı yer almaktadır. Özellikle yüzey sularının içme suyu kaynağı olarak kullanıldığı bölgelerde, mikrokirleticilerin arıtma süreçlerinden tamamen uzaklaştırılamaması insan maruziyeti açısından önemli bir tartışma konusu oluşturmaktadır (Benotti ve diğ., 2009). Konvansiyonel içme suyu arıtma sistemlerinin birçok mikrokirletici için sınırlı giderim kapasitesine sahip olması, bu bileşiklerin arıtılmış sularda iz seviyelerinde bulunmasına neden olabilmektedir.

Bununla birlikte mikrokirleticilerin insan sağlığı üzerindeki etkileri genellikle uzun süreli ve düşük dozlu maruziyet bağlamında değerlendirilmektedir. Birçok mikrokirletici bileşiğin toksikolojik etkileri yüksek dozlarda iyi bilinmesine

rağmen, çevresel ortamlarda gözlenen çok düşük konsantrasyonlardaki uzun süreli maruziyetin sağlık üzerindeki etkileri konusunda halen önemli bilgi boşlukları bulunmaktadır (WHO, 2017). Bu durum, özellikle endokrin bozucu özellik gösteren kimyasallar açısından daha fazla önem kazanmaktadır.

Ayrıca mikrokirleticilerin tek tek değerlendirilmesi çoğu zaman çevresel gerçekliği tam olarak yansıtmamaktadır. Doğal ortamlarda insanlar genellikle çok sayıda kimyasalın birlikte bulunduğu karışımlara maruz kalmaktadır. Bu nedenle son yıllarda yapılan çalışmalar, kimyasal karışımların potansiyel etkilerini değerlendiren karışım toksikolojisi yaklaşımlarına odaklanmaktadır (Backhaus & Faust, 2012). Bu yaklaşım, mikrokirleticilerin insan sağlığı üzerindeki potansiyel risklerinin daha kapsamlı biçimde değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır.

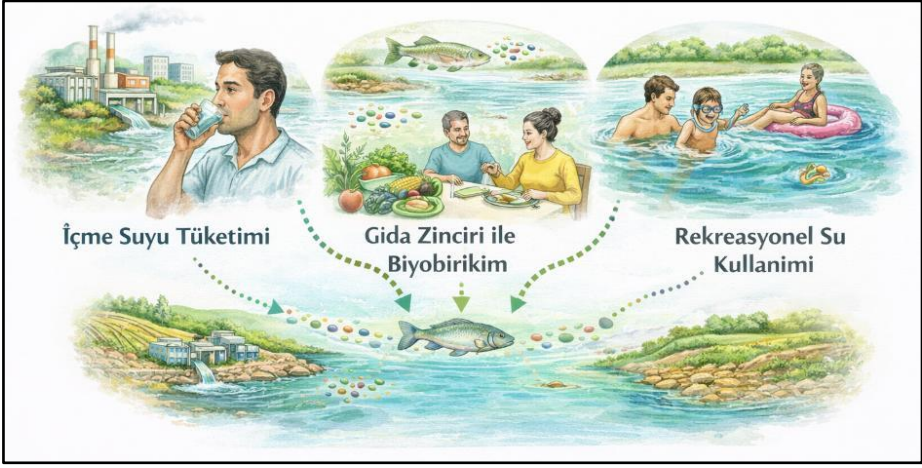
Bu bölümde, yüzey sularında bulunan mikrokirleticilerin insanlara ulaşma yolları ve potansiyel sağlık etkileri ele alınmakta; özellikle maruziyet mekanizmaları, gıda zinciri aracılığıyla taşınım ve uzun süreli düşük doz maruziyetin önemi güncel bilimsel çalışmalar ışığında değerlendirilmektedir.

7.1. Maruziyet Yolları ve Gıda Zinciri

Mikrokirleticilerin insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkilerinin değerlendirilmesinde en önemli konulardan biri, bu bileşiklerin insanlara hangi yollarla ulaştığının belirlenmesidir. Yüzey sularında bulunan mikrokirleticiler doğrudan veya dolaylı yollarla insanlara ulaşabilmekte ve farklı maruziyet mekanizmaları aracılığıyla vücuda alınabilmektedir. Literatürde en yaygın olarak tanımlanan maruziyet yolları arasında içme suyu tüketimi, gıda zinciri aracılığıyla taşınım ve rekreasyonel su kullanımı yer almaktadır (Daughton, 2010). İnsanların mikrokirleticilere maruz kalabileceği başlıca yollar **Tablo 5** ve **Şekil 7**'de özetlenmiştir.

Tablo 5. Mikrokirleticilere insan maruziyet yolları

Maruziyet yolu	Açıklama
İçme suyu	Arıtma sonrası su kaynaklarında kalan mikrokirleticilerin tüketim yoluyla alınması
Gıda zinciri	Sucul organizmalarda biyobirikim sonucu gıdalar aracılığıyla maruziyet
Rekreasyon	Yüzme, su sporları ve diğer rekreasyonel faaliyetler sırasında suyla temas



Şekil 7. Yüzey sularında bulunan mikrokirleticilerin insanlara ulaşma yollarının ve başlıca maruziyet mekanizmalarının kavramsal gösterimi (Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.)

Yüzey sularının içme suyu kaynağı olarak kullanıldığı bölgelerde mikrokirleticiler özellikle önemli bir maruziyet yolu oluşturabilmektedir. Atıksu arıtma tesislerinden kaynaklanan farmasötik maddeler, kişisel bakım ürünleri ve endüstriyel kimyasallar nehir ve göl sistemlerine ulaşabilmekte ve bu su kütlelerinden elde edilen içme sularında iz seviyelerde tespit edilebilmektedir. Her ne kadar içme suyu arıtma sistemleri birçok kirletici bileşiğin uzaklaştırılmasında etkili olsa da bazı mikrokirleticilerin konvansiyonel arıtma süreçlerinden tamamen giderilemediği bilinmektedir (Stackelberg ve diğ., 2004). Bu nedenle içme suyu üretim süreçlerinde mikrokirleticilerin varlığı son yıllarda su kalitesi yönetimi açısından önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir.

Mikrokirleticilerin insanlara ulaşmasında bir diğer önemli yol ise gıda zinciri aracılığıyla taşınımıdır. Sucul ortamlarda bulunan bazı kimyasal bileşikler organizmaların dokularında birikme eğilimi gösterebilmektedir. Bu süreç biyobirikim (bioaccumulation) olarak tanımlanmakta olup özellikle lipofilik özellik gösteren bazı organik kirleticiler için önemli bir mekanizma olarak değerlendirilmektedir (Arnot & Gobas, 2006). Sucul organizmaların dokularında biriken kimyasallar, trofik seviyeler arasında aktarılabilmekte ve daha üst trofik düzeylerde daha yüksek konsantrasyonlara ulaşabilmektedir.

Bu süreç biyomagnifikasyon (biomagnification) olarak adlandırılmakta olup özellikle kalıcı organik kirleticiler ve bazı metaller için önemli bir çevresel risk oluşturmaktadır. Örneğin bazı pestisitler, poliklorlu bifeniller (PCB'ler) ve cıva gibi metaller sucul organizmaların dokularında birikerek balıklar ve diğer su

ürünleri aracılığıyla insan beslenme zincirine dahil olabilmektedir (Kelly ve diğ., 2007). Bu durum özellikle balık tüketiminin yüksek olduğu toplumlarda insan maruziyeti açısından önemli bir değerlendirme konusu oluşturmaktadır.

Rekreasyonel su kullanımı da mikrokirleticilere maruziyet açısından dikkate alınması gereken bir diğer faktördür. Yüzme, su sporları veya diğer rekreasyonel faaliyetler sırasında su ile doğrudan temas gerçekleşebilmekte ve bazı kimyasal bileşikler deri veya kazara yutma yoluyla vücuda alınabilmektedir. Bu maruziyet yolu genellikle içme suyu veya gıda zinciri maruziyetine kıyasla daha sınırlı kabul edilmekle birlikte özellikle yoğun rekreasyonel kullanımın olduğu su kütlelerinde dikkate alınması gereken bir faktör olarak değerlendirilmektedir (WHO, 2018).

Genel olarak değerlendirildiğinde, mikrokirleticilerin insanlara ulaşma yolları oldukça karmaşık bir çevresel süreçler ağı içerisinde gerçekleşmektedir. Yüzey sularında bulunan kirleticiler içme suyu üretimi, gıda zinciri ve rekreasyonel kullanım gibi farklı yollarla insanlara ulaşabilmekte ve bu durum mikrokirleticilerin insan sağlığı açısından bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

7.2. Uzun Süreli Düşük Doz Maruziyetin Önemi

Mikrokirleticilerin insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkileri değerlendirilirken en önemli konulardan biri, çevresel ortamlarda genellikle çok düşük konsantrasyonlarda bulunan bu bileşiklere uzun süre boyunca maruz kalınmasıdır. Geleneksel toksikoloji çalışmaları çoğunlukla yüksek doz maruziyetlere odaklanmış olsa da çevresel gerçeklik çoğu zaman düşük konsantrasyonlu fakat sürekli maruziyetleri içermektedir. Bu nedenle son yıllarda yapılan araştırmalar, mikrokirleticilerin kronik ve düşük dozlu maruziyetler sonucunda ortaya çıkarabileceği potansiyel etkilerin daha ayrıntılı şekilde değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Vandenberg ve diğ., 2012).

Düşük doz maruziyet özellikle hormon sistemini etkileyebilen kimyasallar açısından önemli bir araştırma alanı oluşturmıştır. Endokrin bozucu özellik gösteren bazı kimyasal bileşiklerin çok düşük konsantrasyonlarda dahi biyolojik sistemleri etkileyebildiği bilinmektedir. Bu durum klasik toksikoloji yaklaşımlarında kabul edilen “doz arttıkça etki artar” prensibinin bazı durumlarda geçerli olmayabileceğini göstermektedir. Özellikle hormon benzeri etki gösteren kimyasalların doğrusal olmayan doz-etki ilişkileri gösterebildiği çeşitli çalışmalarda rapor edilmiştir (Diamanti-Kandarakis ve diğ., 2009).

Uzun süreli düşük doz maruziyetin değerlendirilmesini zorlaştıran bir diğer önemli faktör ise çevresel ortamlarda bulunan kimyasal bileşiklerin genellikle tek başına değil, karmaşık kimyasal karışımlar halinde bulunmasıdır. İnsanlar günlük yaşamlarında çok sayıda farklı kimyasal bileşiğe aynı anda maruz

kalabilmektedir. Bu durum bazı bileşiklerin birlikte bulunması sonucunda ortaya çıkabilecek sinerjik veya antagonistik etkilerin değerlendirilmesini gerektirmektedir. Karışım toksikolojisi olarak adlandırılan bu yaklaşım, mikrokirleticilerin potansiyel sağlık etkilerinin daha gerçekçi biçimde değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır (Kortenkamp, 2007).

Mikrokirleticilerin insan sağlığı açısından oluşturabileceği risklerin değerlendirilmesinde bir diğer önemli konu ise maruziyet sürekliliğidir. İçme suyu tüketimi, gıda zinciri ve çevresel temas gibi yollarla gerçekleşen maruziyetler çoğu zaman yaşam boyu devam edebilmektedir. Bu nedenle bazı araştırmacılar mikrokirleticilerin sağlık üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesinde uzun dönemli epidemiyolojik çalışmaların önemine dikkat çekmektedir (WHO, 2017).

Bununla birlikte günümüzde birçok mikrokirletici bileşiğin insan sağlığı üzerindeki etkileri hakkında halen önemli bilgi boşlukları bulunmaktadır. Çevresel ortamlarda tespit edilen çok sayıda kimyasalın toksikolojik özellikleri yeterince araştırılmamış olup bu durum risk değerlendirme süreçlerini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle son yıllarda uluslararası araştırma programları, mikrokirleticilerin kronik maruziyet etkilerini daha iyi anlamaya yönelik disiplinlerarası çalışmaların artırılması gerektiğini vurgulamaktadır (Richardson & Kimura, 2017).

Genel olarak değerlendirildiğinde, mikrokirleticilerin insan sağlığı üzerindeki etkilerinin anlaşılabilmesi için yalnızca kısa süreli toksisite çalışmalarının yeterli olmadığı, bunun yerine uzun süreli düşük doz maruziyetlerin ve kimyasal karışımların birlikte değerlendirilmesi gerektiği görülmektedir. Bu yaklaşım, mikrokirleticilerin çevresel ortamlardaki varlığının insan sağlığı açısından oluşturabileceği potansiyel risklerin daha doğru şekilde anlaşılmasına katkı sağlamaktadır. Mikrokirleticilerin insan sağlığı üzerindeki başlıca potansiyel etkileri **Tablo 6’da** özetlenmiştir.

Tablo 6 Mikrokirleticilerin insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkileri

Kirletici grubu	Olası sağlık etkileri
Endokrin bozucular	Hormonal bozulmalar
Farmasötikler	Antibiyotik direnci
Pestisitler	Nörotoksik etkiler
Ağır metaller	Organ hasarı

8. ARITMA TEKNOLOJİLERİ VE YÖNETİM YAKLAŞIMLARI

Yüzey sularında ve atıksu sistemlerinde tespit edilen mikrokirleticilerin çevresel ortamlardaki varlığı, su kaynaklarının korunması ve sürdürülebilir su yönetimi açısından önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Önceki bölümlerde ele alındığı üzere, farmasötik maddeler, kişisel bakım ürünleri,

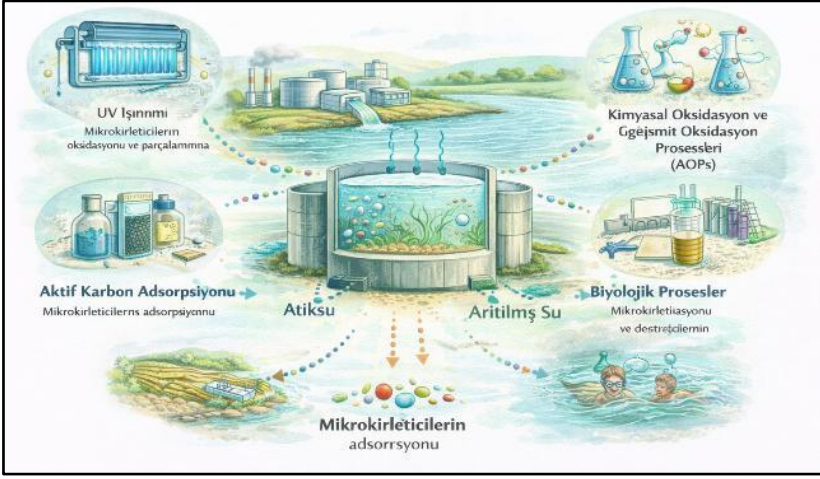
endokrin bozucu kimyasallar ve çeşitli endüstriyel bileşikler yüzey sularına farklı kaynaklardan ulaşabilmekte ve sucul ekosistemler ile insan sağlığı üzerinde potansiyel riskler oluşturabilmektedir. Bu nedenle mikrokirleticilerin çevresel ortamlardaki yayılımının kontrol altına alınabilmesi için etkili arıtma teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanması büyük önem taşımaktadır (Luo ve diğ., 2014).

Geleneksel su ve atıksu arıtma sistemleri temel olarak askıda katı maddeler, organik kirleticiler ve besin elementlerinin giderimine yönelik olarak tasarlanmış olup, çok düşük konsantrasyonlarda bulunan mikrokirleticilerin uzaklaştırılmasında çoğu zaman sınırlı bir performans göstermektedir. Bu durum özellikle atıksu arıtma tesislerinden çıkan suların yüzey sularına verilmesiyle birlikte mikrokirleticilerin nehir, göl ve rezervuar sistemlerine taşınmasına neden olabilmektedir (Verlicchi ve diğ., 2012). Son yıllarda yapılan araştırmalar, konvansiyonel arıtma proseslerinin mikrokirleticilerin yalnızca bir kısmını giderebildiğini ve bazı bileşiklerin arıtılmış sularda iz seviyelerde bulunmaya devam ettiğini göstermektedir (Michael ve diğ., 2013).

Bu sınırlılıklar doğrultusunda son yıllarda mikrokirleticilerin giderimine yönelik olarak çeşitli ileri arıtma teknolojileri geliştirilmiştir (**Şekil 8**). Ozonlama, aktif karbon adsorpsiyonu, membran filtrasyon sistemleri ve gelişmiş oksidasyon prosesleri gibi yöntemler, mikrokirleticilerin daha etkin şekilde uzaklaştırılmasına yönelik umut verici çözümler sunmaktadır (Rodriguez-Narvaez ve diğ., 2017). Bunun yanı sıra yapay sulak alanlar ve doğa temelli arıtma sistemleri gibi alternatif yaklaşımlar da özellikle düşük enerji gereksinimi ve sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sağlayabilmektedir.

Mikrokirleticilerin yönetimi yalnızca arıtma teknolojileri ile sınırlı olmayıp aynı zamanda entegre su kaynakları yönetimi, kirletici kaynak kontrolü ve izleme programlarını da içeren bütüncül bir yaklaşım gerektirmektedir. Yüzey suları ve yeraltı suları arasındaki hidrolik bağlantı dikkate alındığında, mikrokirleticilerin yönetimi havza ölçeğinde planlanan çok disiplinli stratejiler ile ele alınmalıdır. Bu bağlamda arıtma teknolojilerinin geliştirilmesi ile birlikte kirletici kaynakların azaltılması, izleme programlarının güçlendirilmesi ve mevzuat düzenlemelerinin geliştirilmesi de büyük önem taşımaktadır (Schwarzenbach ve diğ., 2010).

Bu bölümde mikrokirleticilerin gideriminde kullanılan başlıca arıtma teknolojileri ve yönetim yaklaşımları ele alınmakta; öncelikle konvansiyonel arıtma sistemlerinin sınırlılıkları tartışılmakta, ardından ileri arıtma teknolojileri ve doğa temelli çözümler değerlendirilmekte ve yüzey suyu-yeraltısuyu sistemlerinin bütüncül yönetimine yönelik yaklaşımlar ele alınmaktadır.



Şekil 8. Mikrokirlleticilerin gideriminde kullanılan ileri arıtma teknolojilerinin kavramsal gösterimi (Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.)

8.1 Konvansiyonel Arıtma Sistemlerinin Sınırlılıkları

Yüzey sularında ve atıksu sistemlerinde tespit edilen mikrokirlleticilerin büyük bir bölümü, geleneksel su ve atıksu arıtma süreçleri için tasarlanmış parametrelerin dışında kalmaktadır. Konvansiyonel arıtma tesisleri temel olarak askıda katı madde, organik madde, besin tuzları ve patojen mikroorganizmaların giderilmesine yönelik olarak tasarlanmış olup, çok düşük konsantrasyonlarda bulunan ve kimyasal olarak oldukça çeşitli özellikler gösteren mikrokirlleticilerin uzaklaştırılmasında sınırlı bir etkinliğe sahiptir. Bu nedenle son yıllarda birçok araştırma, geleneksel arıtma sistemlerinin mikrokirlleticilerin gideriminde yeterli performansı sağlayamadığını ortaya koymuştur (Ternes, 1998; Luo ve diğ., 2014).

Atıksu arıtma tesisleri mikrokirlleticiler açısından önemli bir ara ortam niteliği taşımaktadır. Evsel atıksular, farmasötik maddeler, kişisel bakım ürünleri, hormonlar ve çeşitli endüstriyel kimyasallar gibi çok sayıda mikrokirlletici bileşiği içerebilmektedir. Bu bileşiklerin önemli bir kısmı biyolojik arıtma süreçlerinde tamamen parçalanmamakta ve arıtma tesislerinden çıkış suyuna geçebilmektedir. Yapılan çalışmalar, birçok farmasötik bileşiğin aktif çamur proseslerinde yalnızca kısmi olarak giderilebildiğini göstermektedir (Joss ve diğ., 2006). Bu durum, arıtılmış atıksuların alıcı ortamlara verilmesi sonucunda mikrokirlleticilerin nehir, göl ve rezervuar gibi yüzey suyu sistemlerine taşınmasına neden olmaktadır.

Konvansiyonel arıtma sistemlerinde mikrokirlleticilerin giderimi büyük ölçüde adsorpsiyon, biyolojik parçalanma ve uçuculuk gibi süreçlere bağlı olarak

gerçekleşmektedir. Ancak birçok mikrokirletici bileşiğin kimyasal yapısı bu süreçlere karşı oldukça dirençli olabilmektedir. Özellikle polar ve hidrofilik özellik gösteren bazı farmasötik maddeler, aktif çamur sistemlerinde düşük adsorpsiyon eğilimi göstermekte ve biyolojik olarak yavaş parçalanmaktadır. Bu nedenle bu bileşiklerin önemli bir bölümü arıtma proseslerinden geçerek alıcı ortamlara ulaşabilmektedir (Verlicchi ve diğ., 2012).

Bir diğer önemli sınırlılık ise arıtma tesislerinin tasarım amaçları ile mikrokirleticilerin çevresel davranışı arasındaki uyumsuzluktur. Geleneksel arıtma sistemleri çoğunlukla toplam organik yük veya besin maddeleri gibi parametrelerin giderimine odaklanırken, mikrokirleticiler çok daha düşük konsantrasyonlarda bulunan ve farklı kimyasal özelliklere sahip bileşiklerden oluşmaktadır. Bu nedenle birçok arıtma tesisi mikrokirleticilerin izlenmesi veya giderilmesi amacıyla tasarlanmamıştır. Bu durum özellikle yoğun nüfuslu bölgelerde bulunan arıtma tesislerinden çıkan suların mikrokirletici açısından önemli bir kaynak haline gelmesine yol açabilmektedir (Michael ve diğ., 2013).

Ayrıca bazı durumlarda arıtma süreçleri mikrokirleticilerin tamamen ortadan kaldırılmasını sağlamadığı gibi, dönüşüm ürünlerinin (transformation products) oluşmasına da neden olabilmektedir. Biyolojik parçalanma veya kimyasal oksidasyon süreçleri sırasında bazı kirleticiler daha farklı kimyasal bileşiklere dönüşebilmekte ve bu dönüşüm ürünlerinin toksikolojik özellikleri çoğu zaman yeterince bilinmemektedir. Bu durum mikrokirleticilerin çevresel risk değerlendirmesini daha karmaşık hale getirmektedir (Richardson & Kimura, 2017).

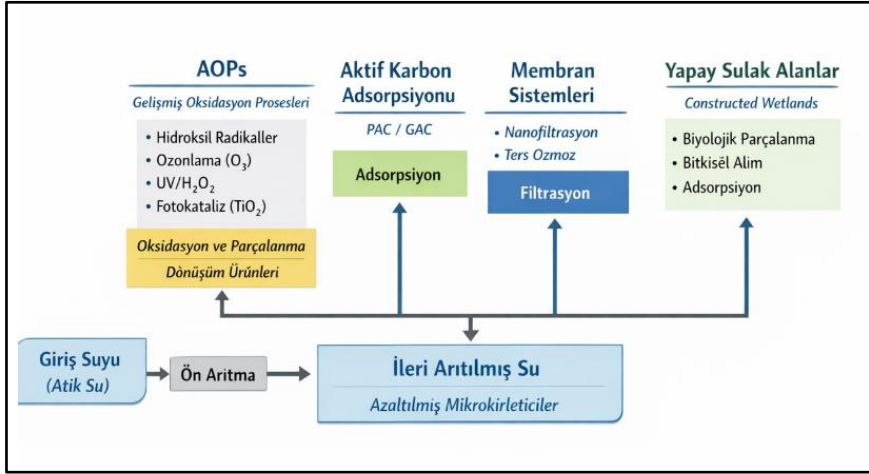
Konvansiyonel arıtma sistemlerinin bir diğer sınırlılığı ise sediman ve çamur fazında biriken kirleticilerle ilişkilidir. Bazı hidrofobik organik bileşikler arıtma tesislerinde oluşan arıtma çamuruna adsorbe olabilmekte ve bu çamurun tarımsal amaçlarla kullanılması durumunda kirleticiler yeniden çevresel ortamlara taşınabilmektedir. Bu nedenle arıtma çamurunun yönetimi de mikrokirleticilerin çevresel yayılımı açısından önemli bir değerlendirme konusu oluşturmaktadır (Clarke & Smith, 2011).

Tüm bu bulgular, konvansiyonel su ve atıksu arıtma sistemlerinin mikrokirleticilerin giderimi açısından sınırlı bir etkinliğe sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenle son yıllarda birçok araştırma ileri arıtma teknolojileri, membran sistemleri, adsorpsiyon prosesleri ve gelişmiş oksidasyon yöntemleri gibi alternatif yaklaşımların geliştirilmesine odaklanmıştır. Bu teknolojiler özellikle düşük konsantrasyonlarda bulunan mikrokirleticilerin daha etkin biçimde uzaklaştırılmasına yönelik çözümler sunmaktadır.

8.2 İleri Arıtma ve Doğal Sistemler

Konvansiyonel su ve atıksu arıtma sistemlerinin mikrokirleticilerin gideriminde sınırlı performans göstermesi, son yıllarda daha gelişmiş arıtma teknolojilerinin geliştirilmesine yönelik araştırmaları hızlandırmıştır. Mikrokirleticiler genellikle çok düşük konsantrasyonlarda bulunmalarına rağmen kimyasal yapı bakımından oldukça çeşitlilik göstermekte ve bazı durumlarda biyolojik parçalanmaya karşı dirençli olabilmektedir. Bu nedenle birçok araştırma, geleneksel arıtma süreçlerini tamamlayıcı veya onların yerine kullanılabilir ileri arıtma teknolojilerinin geliştirilmesine odaklanmaktadır (Luo ve diğ., 2014).

Mikrokirleticilerin gideriminde kullanılan başlıca ileri arıtma teknolojileri ve bu teknolojilerin temel etki mekanizmaları **Şekil 9**'te kavramsal olarak gösterilmektedir.



Şekil 9. İleri arıtma sistemlerinde mikrokirletici giderim süreçlerinin kavramsal şeması

(Kaynak: Yazar tarafından hazırlanmıştır.)

İleri arıtma teknolojileri arasında en yaygın kullanılan yöntemlerden biri gelişmiş oksidasyon prosesleri (Advanced Oxidation Processes, AOPs) olarak bilinmektedir. Bu yöntemler hidroksil radikali gibi yüksek reaktif oksidantların oluşturulması yoluyla organik kirleticilerin parçalanmasını hedeflemektedir. Ozonlama, UV/ H_2O_2 sistemleri ve fotokatalitik oksidasyon gibi teknikler bu kapsamda değerlendirilmektedir. Özellikle ozonlama proseslerinin birçok farmasötik bileşik ve endokrin bozucu kimyasalın parçalanmasında oldukça etkili olduğu çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir (von Gunten, 2003). Bununla birlikte bazı durumlarda oluşan dönüşüm ürünlerinin toksikolojik özelliklerinin tam

olarak bilinmemesi, bu yöntemlerin uygulanmasında dikkat edilmesi gereken önemli bir konudur.

Mikrokirleticilerin gideriminde etkili bir diğer yöntem adsorpsiyon temelli arıtma süreçleridir. Aktif karbon kullanımı özellikle organik mikrokirleticilerin uzaklaştırılmasında yaygın olarak tercih edilen bir yöntemdir. Granüler aktif karbon (GAC) ve toz aktif karbon (PAC) sistemleri, farmasötik maddeler, pestisitler ve bazı endokrin bozucu kimyasalların gideriminde yüksek verim sağlayabilmektedir (Snyder ve diğ., 2007). Adsorpsiyon yöntemleri özellikle içme suyu arıtma tesislerinde ileri arıtma basamağı olarak yaygın biçimde uygulanmaktadır.

Membran teknolojileri de mikrokirleticilerin gideriminde önemli bir rol oynamaktadır. Nanofiltrasyon ve ters ozmoz gibi membran sistemleri, çok düşük molekül ağırlığına sahip kirleticilerin bile etkin şekilde uzaklaştırılmasını sağlayabilmektedir. Bu sistemler özellikle içme suyu üretimi ve ileri atıksu geri kazanım uygulamalarında kullanılmaktadır (Shannon ve diğ., 2008). Ancak membran sistemlerinin yüksek enerji tüketimi, membran kirlenmesi (fouling) ve işletme maliyetleri gibi bazı sınırlılıkları bulunmaktadır.

Son yıllarda sürdürülebilir su yönetimi yaklaşımları kapsamında doğa temelli arıtma sistemleri de önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Yapay sulak alanlar (constructed wetlands), doğal süreçleri taklit eden sistemler olup bitkiler, mikroorganizmalar ve sediman etkileşimleri yoluyla kirleticilerin giderimini sağlayabilmektedir. Bu sistemler özellikle küçük yerleşim birimleri ve kırsal alanlar için düşük maliyetli ve enerji tüketimi açısından avantajlı çözümler sunmaktadır (Vymazal, 2014). Yapay sulak alanlarda mikrokirleticilerin giderimi genellikle adsorpsiyon, bitkisel alım ve mikrobiyal parçalanma süreçlerinin birlikte gerçekleşmesiyle sağlanmaktadır.

İleri arıtma teknolojileri ile doğa temelli sistemlerin birlikte kullanılması, mikrokirleticilerin gideriminde daha etkili sonuçlar sağlayabilmektedir. Bu nedenle son yıllarda birçok araştırma, farklı arıtma teknolojilerinin entegre edildiği hibrit sistemlerin geliştirilmesine odaklanmaktadır. Bu tür sistemler özellikle yoğun nüfuslu bölgelerdeki atıksu arıtma tesisleri ile içme suyu üretim tesislerinde mikrokirleticilerin giderimi açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır (Rodriguez-Narvaez ve diğ., 2017).

Genel olarak değerlendirildiğinde, mikrokirleticilerin etkin şekilde giderilebilmesi için yalnızca tek bir arıtma teknolojisinin yeterli olmadığı, bunun yerine farklı fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçlerin birlikte kullanıldığı çok aşamalı arıtma yaklaşımlarının daha başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu bağlamda ileri arıtma teknolojilerinin geliştirilmesi ve doğa temelli sistemlerle

birlikte uygulanması, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi açısından önemli bir strateji olarak değerlendirilmektedir.

Mikrokirleticilerin gideriminde kullanılan başlıca ileri arıtma teknolojileri ve bu teknolojilerin temel mekanizmaları **Tablo 7’de** özetlenmiştir.

Tablo 7. Mikrokirleticilerin gideriminde kullanılan başlıca ileri arıtma teknolojileri ve giderim mekanizmaları

Arıtma Teknolojisi	Temel Giderim Mekanizması	Giderimde Etkili Olduğu Kirletici Türleri	Başlıca Avantajlar	Başlıca Sınırlılıkları	Kaynak
Ozonlama (O₃)	Güçlü oksidasyon ve moleküler parçalanma	Farasötikler, pestisitler, endokrin bozucular	Yüksek oksidasyon kapasitesi, kısa temas süresi	Dönüşüm ürünleri oluşabilir, yüksek işletme maliyeti	von Gunten, 2003
UV/H₂O₂ (Gelişmiş oksidasyon)	Hidroksil radikali üretimi ile oksidatif parçalanma	Farasötikler, pestisitler, organik kirleticiler	Yüksek reaktivite, geniş kirletici spektrumu	Enerji tüketimi yüksek olabilir	Rodriguez-Narvaez ve diğ., 2017
Fotokatalitik oksidasyon (TiO₂)	Işık aktivasyonu ile reaktif oksijen türlerinin oluşumu	Organik mikrokirleticiler	Tam mineralizasyon potansiyeli	Laboratuvar ölçeğinde daha yaygın	Luo ve diğ., 2014
Aktif karbon adsorpsiyonu (PAC/GAC)	Fiziksel adsorpsiyon	Farasötikler, kişisel bakım ürünleri, pestisitler	Yüksek giderim verimi, uygulanabilir teknoloji	Karbon rejenerasyonu gerekebilir	Snyder ve diğ., 2007
Nanofiltrasyon	Membran ayırma	Organik mikrokirleticiler, bazı metaller	Yüksek ayırma verimi	Membran kirlenmesi (fouling)	Shannon ve diğ., 2008
Ters ozmoz	Yarı geçirgen membran ile moleküler ayırma	Çok geniş kirletici spektrumu	Çok yüksek giderim verimi	Yüksek enerji gereksinimi	Shannon ve diğ., 2008

Yapay sulak alanlar (Constructed wetlands)	Bitkisel alım, mikrobiyal parçalanma ve adsorpsiyon	Farmasötikler, bazı pestisitler	Düşük maliyet, doğa temelli çözüm	Giderim verimi kirleticiliğe bağlı	Vymazal, 2014
Biyolojik ileri arıtma sistemleri (MBR vb.)	Mikroorganizma aktivitesi ve membran filtrasyonu	Farmasötikler, organik mikrokirlleticiler	Yüksek biyolojik giderim	Yüksek işletme maliyeti	Michael ve diğ., 2013

8.3 Yüzey ve Yeraltı Sularının Birlikte Yönetimi

Su kaynaklarının sürdürülebilir biçimde yönetilmesi, yüzey suları ile yeraltı sularının birbirinden bağımsız sistemler olarak değil, hidrolik ve hidrojeokimyasal açıdan birbirine bağlı bileşenler olarak değerlendirilmesini gerektirmektedir. Günümüzde birçok hidrolojik sistemde yüzey suyu ve yeraltı suyu arasında çift yönlü su alışverişi gerçekleşmekte olup bu etkileşim, kirleticilerin çevresel ortamlardaki taşınımını ve dağılımını doğrudan etkileyebilmektedir. Bu nedenle mikrokirleticilerin çevresel kaderi ve su kaynakları üzerindeki etkileri değerlendirilirken yüzey suyu–yeraltı suyu sistemlerinin birlikte ele alınması büyük önem taşımaktadır (Sophocleous, 2002).

Yüzey suları ile yeraltı suları arasındaki hidrolik bağlantı, özellikle nehir-akifer sistemlerinde belirgin şekilde gözlenmektedir. Nehir yatakları boyunca gerçekleşen sızma ve beslenme süreçleri, kirleticilerin yüzey sularından yeraltı suyu sistemlerine taşınmasına neden olabilmektedir. Bu durum özellikle atıksu deşarjlarının veya kirleticili yükü yüksek yüzey suyu sistemlerinin bulunduğu havzalarda daha önemli hale gelmektedir. Yapılan çalışmalar, bazı farmasötik bileşikler ve endüstriyel kimyasalların nehir-akifer etkileşim bölgelerinde yeraltı suyuna geçebildiğini göstermektedir (Lapworth ve diğ., 2012).

Bununla birlikte yüzey suları ile yeraltı suları arasındaki etkileşim yalnızca kirleticili taşınımı açısından değil, aynı zamanda su kalitesinin korunması açısından da önemli bir rol oynamaktadır. Yeraltı suyu sistemleri birçok durumda yüzey sularının beslenmesine katkı sağlayarak akarsu debisinin sürekliliğini desteklemektedir. Ancak kirleticilerle kirlenmiş yeraltı sularının yüzey suyu sistemlerine deşarj olması durumunda, bu kirleticiler sucul ekosistemlere yeniden taşınabilmektedir. Bu nedenle su kaynaklarının korunması için havza ölçeğinde planlanan entegre yönetim yaklaşımlarının uygulanması gerekmektedir (Winter ve diğ., 1998).

Mikrokirleticilerin yönetimi açısından yüzey suyu–yeraltı suyu etkileşim alanları özel önem taşımaktadır. Bu alanlar, kirleticilerin fiziksel, kimyasal ve

biyolojik süreçler aracılığıyla dönüşüme uğradığı dinamik geçiş bölgeleri olarak tanımlanmaktadır. Özellikle hiporeik zon olarak adlandırılan nehir yatağı ve akifer arasındaki geçiş bölgesi, mikrokirleticilerin taşınımı ve dönüşümü açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu bölgede gerçekleşen biyokimyasal süreçler bazı organik kirleticilerin parçalanmasına katkı sağlayabilmektedir (Krause ve diğ., 2011).

Su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi kapsamında geliştirilen modern yaklaşımlar, yüzey ve yeraltı sularının birlikte değerlendirilmesini öngören Entegre Su Kaynakları Yönetimi (Integrated Water Resources Management – IWRM) yaklaşımını temel almaktadır. Bu yaklaşım, su kaynaklarının korunması, kirletici yüklerinin azaltılması ve su kalitesinin iyileştirilmesi için havza ölçeğinde planlanan çok disiplinli stratejileri içermektedir. Mikrokirleticilerin çevresel ortamlardaki varlığı dikkate alındığında, izleme programlarının geliştirilmesi, kirletici kaynakların kontrol edilmesi ve ileri arıtma teknolojilerinin uygulanması bu stratejilerin temel bileşenleri arasında yer almaktadır (UNESCO, 2009).

Sonuç olarak mikrokirleticilerin çevresel etkilerinin etkin biçimde yönetilebilmesi için yüzey suları ve yeraltı sularının birbirinden bağımsız sistemler olarak değil, bütüncül bir hidrolojik sistemin parçaları olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Havza ölçeğinde planlanan entegre yönetim yaklaşımları, mikrokirleticilerin taşınımının kontrol altına alınması ve su kaynaklarının uzun vadeli korunması açısından önemli bir araç olarak değerlendirilmektedir.

9. MEVZUAT VE POLİTİKA ÇERÇEVESİ

Yüzey sularında ve diğer su ortamlarında tespit edilen mikrokirleticilerin çevresel etkileri, son yıllarda su yönetimi politikalarının önemli bir bileşeni haline gelmiştir. Farmasötik maddeler, kişisel bakım ürünleri, endüstriyel kimyasallar ve endokrin bozucu bileşikler gibi çok sayıda mikrokirletici bileşiğin sucul ortamlarda varlığının belirlenmesi, bu kirleticilerin izlenmesi ve yönetilmesine yönelik düzenleyici yaklaşımların geliştirilmesini gerekli kılmıştır. Bu kapsamda birçok ülke ve uluslararası kuruluş, su kalitesinin korunmasına yönelik mevzuat düzenlemelerinde mikrokirleticilerin değerlendirilmesine yönelik yeni yaklaşımlar geliştirmeye başlamıştır (Richardson & Kimura, 2017).

Mikrokirleticiler çoğu zaman çevresel ortamlarda çok düşük konsantrasyonlarda bulunmalarına rağmen, uzun süreli maruziyet ve biyobirikim potansiyelleri nedeniyle su kaynaklarının yönetiminde dikkate alınması gereken kirletici grupları arasında yer almaktadır. Bu durum özellikle içme suyu kaynaklarının korunması, sucul ekosistemlerin sürdürülebilirliği ve insan sağlığının korunması açısından önem taşımaktadır. Bu nedenle son yıllarda su

kalitesi yönetimine yönelik uluslararası düzenlemeler, yalnızca geleneksel kirleticileri değil aynı zamanda “yeni ve gelişen kirleticiler” olarak tanımlanan mikrokirleticileri de kapsayacak şekilde genişletilmektedir (Schwarzenbach ve diğ., 2010).

Uluslararası düzeyde mikrokirleticilerin yönetimine yönelik düzenlemeler büyük ölçüde su kalitesi standartlarının belirlenmesi, izleme programlarının geliştirilmesi ve kirletici kaynaklarının kontrol altına alınması üzerine odaklanmaktadır. Özellikle Avrupa Birliği Su Çerçeve Direktifi gibi kapsamlı düzenleyici çerçeveler, su kütlelerinin kimyasal durumunun değerlendirilmesinde öncelikli kirleticiler listesinin oluşturulmasını ve bu kirleticilerin izlenmesini öngörmektedir (European Commission, 2013). Bunun yanı sıra Dünya Sağlık Örgütü tarafından yayımlanan içme suyu kalite rehberleri de su kaynaklarında bulunabilecek kimyasal kirleticilerin değerlendirilmesine yönelik önemli bir referans oluşturmaktadır (WHO, 2017).

Türkiye’de ise su kalitesinin korunmasına yönelik mevzuat düzenlemeleri büyük ölçüde Avrupa Birliği mevzuatı ile uyumlu biçimde geliştirilmiştir. Son yıllarda yürürlüğe giren çeşitli yönetmelikler, yüzey suyu ve yeraltı suyu kalitesinin izlenmesine yönelik düzenlemeleri içermekte ve su kaynaklarının korunmasına yönelik politika araçlarını belirlemektedir. Bununla birlikte mikrokirleticilerin izlenmesi ve yönetilmesine yönelik çalışmalar halen gelişim sürecinde olup, özellikle izleme programlarının genişletilmesi ve veri tabanlarının oluşturulması önemli bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir.

Bu bölümde mikrokirleticilerin yönetimine yönelik uluslararası düzenleyici yaklaşımlar ve politika çerçeveleri ele alınmakta; ardından Türkiye’de su kalitesi yönetimine ilişkin mevcut mevzuat düzenlemeleri ve uygulamalar değerlendirilmektedir.

9.1 Uluslararası Düzenlemeler

Su kaynaklarında tespit edilen mikrokirleticilerin çevresel etkilerinin giderek daha fazla anlaşılması, su kalitesi yönetimine yönelik uluslararası düzenlemelerde yeni yaklaşımların geliştirilmesini gerekli kılmıştır. Geleneksel su kalitesi yönetimi uzun yıllar boyunca besin tuzları, ağır metaller ve organik kirlilik gibi klasik kirleticilere odaklanmış olsa da son yıllarda farmasötik maddeler, kişisel bakım ürünleri, endokrin bozucu kimyasallar ve çeşitli endüstriyel bileşikler gibi mikrokirleticilerin sucul ortamlarda yaygın olarak tespit edilmesi, bu kirleticilerin mevzuat kapsamında değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur (Schwarzenbach ve diğ., 2010).

Uluslararası düzeyde su kalitesi yönetimine ilişkin en kapsamlı düzenleyici çerçevelerden biri Avrupa Birliği tarafından geliştirilen Su Çerçeve Direktifi (Water Framework Directive – WFD)’dir. 2000 yılında yürürlüğe giren bu

direktif, Avrupa Birliği ülkelerinde yüzey suları ve yeraltı sularının korunmasına yönelik bütüncül bir yaklaşım ortaya koymaktadır. Direktifin temel amacı, su kütlelerinin kimyasal ve ekolojik durumunun iyileştirilmesi ve su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımının sağlanmasıdır (European Commission, 2000). Bu kapsamda su kütleleri için “iyi kimyasal durum” ve “iyi ekolojik durum” hedefleri belirlenmiş ve bu hedeflere ulaşılabilmesi için üye ülkelerde izleme programlarının oluşturulması zorunlu hale getirilmiştir.

Su Çerçeve Direktifi kapsamında su kalitesi değerlendirmelerinde “öncelikli maddeler (priority substances)” ve “belirli kirleticiler (specific pollutants)” olmak üzere iki farklı kirletici grubu tanımlanmıştır. Öncelikli maddeler, sucul ortamlarda önemli risk oluşturduğu belirlenen ve Avrupa Birliği genelinde izlenmesi gereken kirleticileri kapsamaktadır. Bu maddeler için çevresel kalite standartları belirlenmiş olup üye ülkelerin bu standartlara uyum sağlaması beklenmektedir (European Commission, 2013). Bu listede pestisitler, bazı endüstriyel kimyasallar ve çeşitli organik kirleticiler yer almakta olup zaman içerisinde yeni kirleticilerin de bu listeye eklenmesi planlanmaktadır.

Avrupa Birliği mevzuatında mikrokirleticilerin yönetimi kapsamında geliştirilen bir diğer yaklaşım ise “izleme listesi (watch list)” uygulamasıdır. Bu uygulama kapsamında çevresel ortamlarda bulunma potansiyeli yüksek olan ve henüz yeterli veri bulunmayan bazı kirleticiler belirlenmekte ve bu maddelerin yüzey sularında izlenmesi önerilmektedir. Böylece yeni ve gelişen kirleticilerin çevresel ortamlardaki dağılımı hakkında veri elde edilmesi ve gerekli durumlarda mevzuat düzenlemelerinin güncellenmesi hedeflenmektedir (Loos ve diğ., 2018).

Amerika Birleşik Devletleri’nde ise su kalitesinin korunmasına yönelik temel yasal çerçeve Temiz Su Yasası (Clean Water Act) kapsamında oluşturulmuştur. Bu kapsamda ABD Çevre Koruma Ajansı (United States Environmental Protection Agency - USEPA), sucul ortamlarda potansiyel risk oluşturabilecek kirleticilerin belirlenmesi ve izlenmesine yönelik çeşitli programlar yürütmektedir. USEPA tarafından hazırlanan Contaminant Candidate List (CCL), içme suyu kaynaklarında bulunma potansiyeli olan kirleticilerin belirlenmesine yönelik önemli bir araç olarak kullanılmaktadır (USEPA, 2015). Bu liste, gelecekte içme suyu mevzuatına dahil edilebilecek kimyasal kirleticilerin belirlenmesine yönelik bilimsel çalışmaların temelini oluşturmaktadır.

Uluslararası kuruluşlar da mikrokirleticilerin yönetimine yönelik rehber dokümanlar hazırlamaktadır. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından yayımlanan içme suyu kalite rehberleri, su kaynaklarında bulunabilecek kimyasal kirleticilerin sağlık açısından değerlendirilmesine yönelik önemli referans dokümanları arasında yer almaktadır. Bu rehberlerde mikrokirleticilerin insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkileri değerlendirilmekte ve içme suyu

kaynaklarının korunmasına yönelik risk temelli yaklaşımlar önerilmektedir (WHO, 2017).

Genel olarak değerlendirildiğinde, uluslararası düzeyde mikrokirleticilerin yönetimine yönelik mevzuat düzenlemelerinin henüz gelişim sürecinde olduğu görülmektedir. Birçok ülkede bu kirleticilere ilişkin çevresel kalite standartları sınırlı sayıda madde için belirlenmiş olup, yeni ve gelişen kirleticilerin izlenmesine yönelik araştırmalar devam etmektedir. Bu nedenle mikrokirleticilerin çevresel ortamlardaki varlığına ilişkin bilimsel verilerin artırılması ve bu verilerin mevzuat düzenlemelerine entegre edilmesi, su kaynaklarının korunması açısından önemli bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir.

Uluslararası su politikalarında mikrokirleticilerin yönetimine yönelik başlıca düzenlemeler **Tablo 8’de** verilmiştir.

Tablo 8. Uluslararası su politikalarında mikrokirletici yönetimine yönelik başlıca düzenlemeler

Kurum	Düzenleme
Avrupa Birliği	Su Çerçeve Direktifi
Avrupa Birliği	Öncelikli Maddeler Direktifi
USEPA	Contaminant Candidate List
WHO	Drinking Water Guidelines

9.2 Türkiye’de Mevcut Durum

Türkiye’de su kalitesinin korunmasına yönelik mevzuat çerçevesi, Avrupa Birliği su politikaları doğrultusunda geliştirilen çeşitli yönetmelik ve düzenlemelerden oluşmaktadır. Özellikle son yıllarda yürürlüğe giren yönetmelikler ve havza ölçeğinde yürütülen su yönetimi çalışmaları, yüzey suları ve yeraltı sularının korunmasına yönelik daha bütüncül bir yaklaşımın benimsenmesini sağlamıştır. Bununla birlikte mikrokirleticilerin su ortamlarındaki varlığı ve çevresel etkileri konusunda yürütülen çalışmalar henüz gelişim aşamasında olup, bu kirleticilerin izlenmesi ve yönetimine yönelik mevzuat düzenlemeleri sınırlı düzeydedir.

Türkiye’de su kalitesinin korunmasına yönelik temel düzenlemelerden biri Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği’dir. İlk olarak 1988 yılında yürürlüğe giren ve zaman içerisinde çeşitli değişikliklere uğrayan bu yönetmelik, alıcı ortamların korunmasına yönelik deşarj standartlarını ve su kalite sınıflandırmalarını belirlemektedir. Yönetmelik kapsamında yüzey suları fiziksel, kimyasal ve biyolojik parametreler açısından sınıflandırılmakta ve su kalitesinin korunmasına yönelik sınır değerler tanımlanmaktadır (Resmî Gazete, 2004). Ancak bu yönetmelikte mikrokirleticiler olarak tanımlanan farmasötik maddeler veya

kişisel bakım ürünleri gibi bileşiklere yönelik doğrudan düzenlemeler bulunmamaktadır.

Yüzey suyu kalitesinin değerlendirilmesine yönelik daha güncel düzenlemelerden biri Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği'dir. Bu yönetmelik Avrupa Birliği Su Çerçeve Direktifi ile uyumlu olarak hazırlanmış olup yüzey suyu kütlelerinin kimyasal ve ekolojik durumunun değerlendirilmesine yönelik kriterleri içermektedir. Yönetmelik kapsamında su kütleleri için çevresel kalite standartları belirlenmiş ve bazı kirleticiler için izleme programları oluşturulmuştur (Resmî Gazete, 2016). Bununla birlikte mikrokirleticiler kapsamında değerlendirilebilecek birçok bileşik henüz düzenli izleme parametreleri arasında yer almamaktadır.

Yeraltı suyu kaynaklarının korunmasına yönelik en önemli düzenlemelerden biri ise Yeraltı Sularının Kirlenmeye ve Bozulmaya Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik'tir. Bu yönetmelik yeraltı suyu kalitesinin izlenmesi, kirlenme risklerinin değerlendirilmesi ve yeraltı suyu kütlelerinin korunmasına yönelik önlemleri içermektedir. Yönetmelik kapsamında yeraltı sularının kimyasal durumunun değerlendirilmesine yönelik kalite standartları belirlenmiş olup, yeraltı suyu kaynaklarının sürdürülebilir kullanımına yönelik çeşitli düzenlemeler yapılmıştır (Resmî Gazete, 2012).

Türkiye'de su yönetimi alanında son yıllarda geliştirilen önemli araçlardan biri de havza yönetim planlarıdır. Havza ölçeğinde hazırlanan bu planlar, su kaynaklarının miktar ve kalite açısından sürdürülebilir yönetimini hedeflemekte ve kirletici kaynakların belirlenmesi ile kontrol altına alınmasına yönelik stratejiler içermektedir. Havza yönetim planları kapsamında yürütülen izleme çalışmaları, yüzey ve yeraltı suyu sistemlerinin birlikte değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu yaklaşım özellikle mikrokirleticilerin çevresel ortamlardaki taşınımının anlaşılması açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır.

Bununla birlikte Türkiye'de mikrokirleticilerin su ortamlarında izlenmesine yönelik çalışmalar büyük ölçüde akademik araştırmalar ve proje bazlı çalışmalar ile sınırlı kalmaktadır. Özellikle farmasötik maddeler, pestisitler ve endokrin bozucu kimyasallar gibi mikrokirleticilerin yüzey ve yeraltı sularındaki dağılımına ilişkin veri sayısı henüz sınırlıdır. Bu nedenle su kalitesi izleme programlarının kapsamının genişletilmesi, mikrokirleticilerin düzenli olarak izlenmesi ve elde edilen verilerin ulusal su yönetim politikalarına entegre edilmesi önemli bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir (TÜBİTAK, 2018).

Genel olarak değerlendirildiğinde Türkiye'de su kalitesinin korunmasına yönelik mevzuat yapısının büyük ölçüde oluşturulmuş olduğu, ancak mikrokirleticilerin izlenmesi ve yönetilmesine yönelik düzenlemelerin henüz

gelişim sürecinde bulunduğu görülmektedir. Bu nedenle uluslararası mevzuat uygulamalarından elde edilen deneyimlerin değerlendirilmesi ve bilimsel araştırmalarla elde edilen verilerin su yönetimi politikalarına entegre edilmesi, mikrokirleticilerin su kaynakları üzerindeki potansiyel etkilerinin azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır.

Türkiye’de su kalitesi yönetimine ilişkin başlıca mevzuat düzenlemeleri **Tablo 9’da** özetlenmiştir.

Tablo 9. Türkiye’de su kalitesi yönetimine ilişkin başlıca mevzuat düzenlemeleri

Mevzuat	Kapsam
Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği	Deşarj standartları
Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği	Su kalite sınıfları
Yeraltı Sularının Korunması Yönetmeliği	Yeraltı suyu kalite yönetimi
Havza Yönetim Planları	Havza ölçeğinde yönetim

10. SONUÇLAR VE GELECEK PERSPEKTİFLER

Son yıllarda gerçekleştirilen bilimsel çalışmalar, mikrokirleticilerin yüzey sularında, yeraltı sularında ve hatta içme suyu kaynaklarında düşük konsantrasyonlarda bulunabildiğini ortaya koymuştur. Farmasötik maddeler, kişisel bakım ürünleri, endokrin bozucu kimyasallar, pestisitler ve çeşitli endüstriyel bileşikler gibi çok sayıda mikrokirletici bileşiğin sucul ortamlarda tespit edilmesi, bu kirleticilerin çevresel kaderi ve potansiyel etkilerinin daha ayrıntılı biçimde araştırılmasını gerekli kılmıştır. Bu derleme kapsamında mikrokirleticilerin kaynakları, çevresel davranışları, yüzey suyu–yeraltı suyu etkileşimleri, ekolojik etkileri, insan sağlığı üzerindeki potansiyel riskleri ve arıtma teknolojileri bütüncül bir yaklaşımla ele alınmıştır.

Mikrokirleticilerin çevresel ortamlardaki varlığı, modern toplumların su kullanımı ve kimyasal üretim faaliyetleri ile yakından ilişkilidir. Bu kirleticiler çoğu zaman çok düşük konsantrasyonlarda bulunmalarına rağmen kalıcılık, biyobirikim ve kronik maruziyet gibi özellikleri nedeniyle sucul ekosistemler ve insan sağlığı açısından önemli bir araştırma konusu oluşturmaktadır. Özellikle yüzey suları ile yeraltı suları arasındaki hidrolik bağlantı dikkate alındığında, mikrokirleticilerin çevresel ortamlardaki taşınımının havza ölçeğinde değerlendirilmesi gerektiği anlaşılmaktadır (Lapworth ve diğ., 2012).

Bununla birlikte mikrokirleticilerin çevresel etkilerinin tam olarak anlaşılabilmesi için disiplinlerarası araştırmaların artırılması gerekmektedir. Analitik kimya alanındaki gelişmeler sayesinde çok düşük konsantrasyonlarda bulunan kirleticilerin tespit edilmesi mümkün hale gelmiş olsa da bu kirleticilerin ekolojik ve toksikolojik etkileri hakkında halen önemli bilgi eksiklikleri

bulunmaktadır. Bu nedenle su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi açısından mikrokirleticilere yönelik araştırmaların ve izleme çalışmalarının artırılması büyük önem taşımaktadır (Schwarzenbach ve diğ., 2010).

10.1 Bilgi Boşlukları ve Araştırma İhtiyaçları

Mikrokirleticiler konusunda son yıllarda önemli ilerlemeler kaydedilmiş olmasına rağmen, bu kirleticilerin çevresel ortamlardaki davranışları ve etkileri hakkında halen birçok bilgi boşluğu bulunmaktadır. Özellikle farklı kirletici gruplarının çevresel ortamlardaki kaderi, biyolojik parçalanma süreçleri ve dönüşüm ürünlerinin toksikolojik özellikleri hakkında daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Birçok mikrokirletici bileşiğin çevresel ortamlardaki dönüşüm süreçleri sonucunda yeni kimyasal bileşikler oluşabilmekte ve bu dönüşüm ürünlerinin çevresel etkileri çoğu zaman yeterince bilinmemektedir (Richardson & Kimura, 2017).

Bir diğer önemli araştırma alanı, mikrokirleticilerin karışım etkileri ile ilişkilidir. Doğal ortamlarda kirleticiler genellikle tek başına bulunmamakta, farklı kimyasal bileşiklerin bir arada bulunduğu karmaşık karışımlar halinde yer almaktadır. Bu durum bazı kirleticilerin birlikte bulunması sonucunda ortaya çıkabilecek sinerjik veya antagonistik etkilerin değerlendirilmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle çevresel risk değerlendirmelerinde kimyasal karışımların etkilerini dikkate alan yeni yaklaşımların geliştirilmesi gerekmektedir (Backhaus & Faust, 2012).

Mikrokirleticilerin yüzey suyu ve yeraltı suyu sistemleri arasındaki taşınımı da araştırılması gereken önemli konular arasında yer almaktadır. Özellikle nehir–akifer etkileşim bölgelerinde mikrokirleticilerin taşınımı ve dönüşüm süreçlerinin daha ayrıntılı biçimde incelenmesi gerekmektedir. Bu tür çalışmalar, su kaynaklarının korunmasına yönelik yönetim stratejilerinin geliştirilmesine önemli katkılar sağlayacaktır (Krause ve diğ., 2011).

Analitik yöntemlerdeki gelişmeler de mikrokirleticilerin araştırılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Yüksek çözünürlüklü kütle spektrometrisi gibi gelişmiş analiz teknikleri sayesinde çevresel ortamlarda daha önce tespit edilemeyen birçok yeni kirletici belirlenebilmektedir. Bu nedenle su kalitesi izleme programlarının geliştirilmesi ve yeni analitik yöntemlerin uygulanması, mikrokirleticilerin çevresel ortamlardaki dağılımının daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak mikrokirleticilerin çevresel etkilerinin daha iyi anlaşılabilmesi için hidrojeoloji, çevre mühendisliği, toksikoloji, ekoloji ve analitik kimya gibi farklı disiplinlerin birlikte çalışmasını gerektiren kapsamlı araştırma programlarına ihtiyaç bulunmaktadır. Bu tür disiplinlerarası çalışmalar, su

kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi açısından bilimsel temelli politika ve yönetim stratejilerinin geliştirilmesine önemli katkılar sağlayacaktır.

10.2 Entegre Su Kaynakları Yönetimi Perspektifi

Mikrokirleticilerin sucul ortamlardaki varlığı ve potansiyel etkileri, su kaynaklarının yönetiminde bütüncül ve disiplinlerarası yaklaşımların benimsenmesini gerekli kılmaktadır. Geleneksel su yönetimi yaklaşımları çoğu zaman yüzey suları ve yeraltı sularını ayrı sistemler olarak ele almış olsa da günümüzde bu iki su kaynağının hidrolik ve hidrojeokimyasal açıdan birbirine bağlı olduğu kabul edilmektedir. Bu nedenle mikrokirleticilerin çevresel ortamlardaki taşınımı ve etkilerinin etkin biçimde yönetilebilmesi için yüzey suyu ve yeraltı suyu sistemlerinin birlikte değerlendirildiği Entegre Su Kaynakları Yönetimi (Integrated Water Resources Management – IWRM) yaklaşımının uygulanması büyük önem taşımaktadır (UNESCO, 2009).

Entegre su kaynakları yönetimi, su kaynaklarının miktar ve kalite açısından sürdürülebilir kullanımını hedefleyen ve farklı sektörler arasında koordinasyonu esas alan bir yönetim yaklaşımıdır. Bu yaklaşım kapsamında su kaynaklarının korunması, kirleticiler yüklerinin azaltılması ve su kalitesinin iyileştirilmesi için havza ölçeğinde planlanan stratejiler geliştirilmektedir. Mikrokirleticiler söz konusu olduğunda bu yaklaşım, kirleticiler kaynakların belirlenmesi, izleme programlarının geliştirilmesi, arıtma teknolojilerinin uygulanması ve mevzuat düzenlemelerinin güçlendirilmesi gibi çeşitli yönetim araçlarının birlikte kullanılmasını gerektirmektedir (Gleick, 2003).

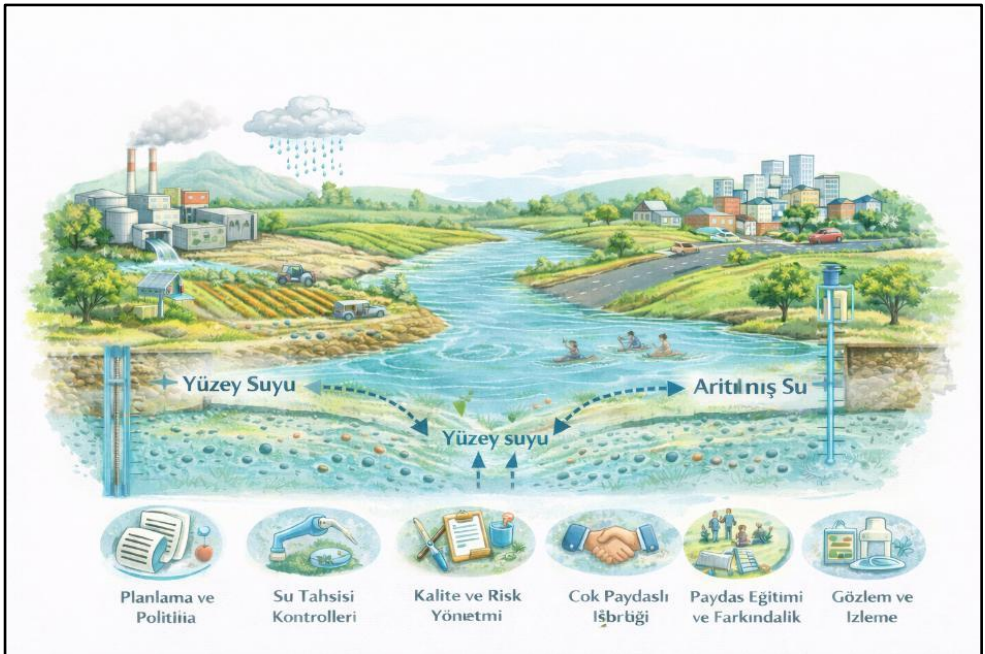
Havza ölçeğinde gerçekleştirilen su yönetimi çalışmaları, mikrokirleticilerin çevresel ortamlardaki dağılımının daha iyi anlaşılmasına olanak sağlamaktadır. Özellikle yüzey suyu–yeraltı suyu etkileşim bölgelerinde gerçekleştirilen izleme çalışmaları, kirleticilerin hidrolik sistem içerisindeki taşınımını ve dönüşüm süreçlerini ortaya koyabilmektedir. Bu tür çalışmalar, su kaynaklarının korunmasına yönelik yönetim stratejilerinin geliştirilmesine önemli katkılar sağlamaktadır (Sophocleous, 2002).

Mikrokirleticilerin yönetiminde bir diğer önemli yaklaşım ise kaynaktan kontrol stratejilerinin geliştirilmesidir. Bu stratejiler, kirleticilerin çevresel ortamlara ulaşmadan önce azaltılmasını hedeflemektedir. Farmasötik maddelerin uygun şekilde bertaraf edilmesi, endüstriyel deşarjların kontrol altına alınması ve tarımsal faaliyetlerde kullanılan kimyasalların yönetimi gibi uygulamalar, mikrokirletici yüklerinin azaltılmasına katkı sağlayabilmektedir. Bunun yanı sıra su arıtma tesislerinde ileri arıtma teknolojilerinin uygulanması da mikrokirleticilerin sucul ortamlara ulaşmasını önemli ölçüde azaltabilmektedir (Rodriguez-Narvaez ve diğ., 2017).

Entegre su kaynakları yönetimi kapsamında geliştirilen bir diğer önemli araç ise su kalitesi izleme programlarıdır. Düzenli olarak gerçekleştirilen izleme çalışmaları, su ortamlarında bulunan kirleticilerin konsantrasyonlarının belirlenmesine ve zaman içerisindeki değişimlerin izlenmesine olanak sağlamaktadır. Bu veriler hem bilimsel araştırmalar hem de su yönetimi politikalarının geliştirilmesi açısından önemli bir bilgi kaynağı oluşturmaktadır (Schwarzenbach ve diğ., 2010).

Sonuç olarak mikrokirleticilerin su kaynakları üzerindeki etkilerinin azaltılabilmesi için yalnızca arıtma teknolojilerine odaklanan yaklaşımlar yeterli değildir. Bunun yerine kirletici kaynakların kontrolü, izleme programlarının geliştirilmesi, havza ölçeğinde planlanan yönetim stratejileri ve ulusal mevzuat düzenlemelerinin birlikte değerlendirildiği entegre yönetim yaklaşımlarının uygulanması gerekmektedir. Bu yaklaşım, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi ve gelecek nesiller için güvenli su kaynaklarının korunması açısından önemli bir perspektif sunmaktadır.

Mikrokirleticilerin yönetimine yönelik bütüncül yaklaşım **Şekil 10'da** kavramsal olarak gösterilmektedir.



11. KAYNAKLAR

- Alloway, B. J. (2013). Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability (3rd ed.). Springer, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7>
- Arnold, K. E., Brown, A. R., Ankley, G. T., & Sumpter, J. P. (2014). Medicines in the environment: A global perspective on their occurrence and potential ecological effects. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 33, 163–174.
- Arnot, J. A., & Gobas, F. A. P. C. (2006). A review of bioconcentration factor (BCF) and bioaccumulation factor (BAF) assessments for organic chemicals in aquatic organisms. *Environmental Reviews*, 14, 257–297.
- Aus der Beek, T., Weber, F.-A., Bergmann, A., Hickmann, S., Ebert, I., Hein, A., & Küster, A. (2016). Pharmaceuticals in the environment—Global occurrences and perspectives. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 35(4), 823–835. <https://doi.org/10.1002/etc.3339>
- Backhaus, T., & Faust, M. (2012). Predictive environmental risk assessment of chemical mixtures: A conceptual framework. *Environmental Science & Technology*, 46, 2564–2573.
- Banzhaf, S., Krein, A., & Scheytt, T. (2017). Using selected emerging compounds as indicators for riverbank filtration. *Water Research*, 123, 440–449. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.06.074>
- Barbosa, M. O., Moreira, N. F. F., Ribeiro, A. R., Pereira, M. F. R., & Silva, A. M. T. (2016). Occurrence and removal of organic micropollutants: An overview of the watch list of EU Decision 2015/495. *Water Research*, 94, 257–279. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.02.047>
- Benotti, M. J., Trenholm, R. A., Vanderford, B. J., Holady, J. C., Stanford, B. D., & Snyder, S. A. (2009). Pharmaceuticals and endocrine disrupting compounds in U.S. drinking water. *Environmental Science & Technology*, 43, 597–603.
- Boano, F., Harvey, J. W., Marion, A., Packman, A. I., Revelli, R., Ridolfi, L., & Wörman, A. (2014). Hyporheic flow and transport processes: Mechanisms, models, and biogeochemical implications. *Reviews of Geophysics*, 52(4), 603–679. <https://doi.org/10.1002/2012RG000417>
- Brausch, J. M., & Rand, G. M. (2011). A review of personal care products in the aquatic environment: Environmental concentrations and toxicity. *Chemosphere*, 82, 1518–1532.
- Brodin, T., Fick, J., Jonsson, M., & Klaminder, J. (2013). Dilute concentrations of a psychiatric drug alter behavior of fish from natural populations. *Science*, 339, 814–815.

- Burkhard, L. P. (2000). Estimating dissolved organic carbon partition coefficients for nonionic organic chemicals. *Environmental Science & Technology*, 34(22), 4663–4668. <https://doi.org/10.1021/es000974p>
- Caliman, F. A., & Gavrilescu, M. (2009). Pharmaceuticals, personal care products and endocrine disrupting agents in the environment: A review. *Clean – Soil, Air, Water*, 37(4–5), 277–303. <https://doi.org/10.1002/clen.200900038>
- Clarke, B. O., & Smith, S. R. (2011). Review of emerging organic contaminants in biosolids and assessment of international research priorities. *Environment International*, 37, 226–247.
- Daughton, C. G. (2010). Pharmaceuticals in the environment: Sources and their management. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 365, 2137–2147.
- Diamanti-Kandarakis, E., Bourguignon, J.-P., Giudice, L. C., Hauser, R., Prins, G. S., Soto, A. M., Zoeller, R. T., & Gore, A. C. (2009). Endocrine-disrupting chemicals: An Endocrine Society scientific statement. *Endocrine Reviews*, 30(4), 293–342. <https://doi.org/10.1210/er.2009-0002>
- Ebele, A. J., Abdallah, M. A. E., & Harrad, S. (2017). Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in the freshwater aquatic environment. *Emerging Contaminants*, 3(1), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2016.12.004>
- Eggleton, J., & Thomas, K. V. (2004). A review of factors affecting the release and bioavailability of contaminants during sediment disturbance events. *Environment International*, 30(7), 973–980. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.03.001>
- European Commission. (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of water policy.
- European Commission. (2013). Directive 2013/39/EU of the European Parliament and of the Council amending Directives 2000/60/EC and 2008/105/EC as regards priority substances in the field of water policy.
- Fent, K., Weston, A. A., & Caminada, D. (2006). Ecotoxicology of human pharmaceuticals. *Aquatic Toxicology*, 76, 122–159.
- Foster, S., & Chilton, J. (2003). Groundwater: The processes and global significance of aquifer degradation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 358, 1957–1972.
- Giesy, J. P., & Kannan, K. (2002). Perfluorochemical surfactants in the environment. *Environmental Science & Technology*, 36(7), 146A–152A. <https://doi.org/10.1021/es022253t>

- Gleick, P. H. (2003). Global freshwater resources: Soft-path solutions for the 21st century. *Science*, 302, 1524–1528.
- Harrad, S. (2009). Persistent organic pollutants. Chichester: Wiley-Blackwell.
- Heberer, T. (2002). Occurrence, fate, and removal of pharmaceutical residues in the aquatic environment. *Toxicology Letters*, 131(1–2), 5–17. [https://doi.org/10.1016/S0378-4274\(02\)00041-3](https://doi.org/10.1016/S0378-4274(02)00041-3)
- Hellström, G., Klaminder, J., Finn, F., Persson, L., Alanärä, A., Jonsson, M., & Brodin, T. (2016). GABAergic pharmaceuticals alter feeding behavior of fish and affect ecosystem processes. *Science Advances*, 2, e1600852.
- Jiang, J., Zhou, Z., & Sharma, V. K. (2013). Occurrence, transportation, monitoring and treatment of emerging micropollutants in wastewater: A review from global perspectives. *Microchemical Journal*, 110, 292–300. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2013.04.014>
- Jobling, S., Nolan, M., Tyler, C. R., Brighty, G., & Sumpter, J. P. (1998). Widespread sexual disruption in wild fish. *Nature*, 392, 767–770.
- Jobling, S., Williams, R., Johnson, A., Taylor, A., Gross-Sorokin, M., Nolan, M., Tyler, C., van Aerle, R., Santos, E., & Brighty, G. (2006). Predicted exposures to steroid estrogens in UK rivers correlate with widespread sexual disruption in wild fish populations. *Environmental Health Perspectives*, 114, 32–39.
- Joss, A., Zabczynski, S., Göbel, A., Hoffmann, B., Löffler, D., Mc Ardell, C. S., Ternes, T. A., Thomsen, A., & Siegrist, H. (2006). Biological degradation of pharmaceuticals in municipal wastewater treatment. *Water Research*, 40, 1686–1696.
- Kelly, B. C., Ikonomou, M. G., Blair, J. D., Morin, A. E., & Gobas, F. A. (2007). Food web-specific biomagnification of persistent organic pollutants. *Science*, 317, 236–239.
- Khetan, S. K., & Collins, T. J. (2007). Human pharmaceuticals in the aquatic environment: A challenge to green chemistry. *Chemical Reviews*, 107(6), 2319–2364. <https://doi.org/10.1021/cr020441w>
- Kidd, K. A., Blanchfield, P. J., Mills, K. H., Palace, V. P., Evans, R. E., Lazorchak, J. M., & Flick, R. W. (2007). Collapse of a fish population after exposure to a synthetic estrogen. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104, 8897–8901.
- Kim, M. K., & Zoh, K. D. (2016). Occurrence and removals of micropollutants in water environment. *Environmental Engineering Research*, 21(4), 319–332. <https://doi.org/10.4491/eer.2016.103>

- Kleywegt, S., Pileggi, V., Yang, P., Hao, C., Zhao, X., Rocks, C., & Whitehead, B. (2011). Pharmaceuticals, hormones and bisphenol A in untreated source and finished drinking water in Ontario, Canada: Occurrence and treatment efficiency. *Science of the Total Environment*, 409(8), 1481–1488. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.01.010>
- Kortenkamp, A. (2007). Ten years of mixing cocktails: A review of combination effects of endocrine-disrupting chemicals. *Environmental Health Perspectives*, 115, 98–105.
- Krause, S., Hannah, D., Fleckenstein, J., Heppell, C., Kaeser, D., Pickup, R., Pinay, G., Robertson, A., & Wood, P. (2011). Interdisciplinary perspectives on processes in the hyporheic zone. *Ecohydrology*, 4, 481–499.
- Lapworth, D. J., Baran, N., Stuart, M. E., & Ward, R. S. (2012). Emerging organic contaminants in groundwater: A review of sources, fate and occurrence. *Environmental Pollution*, 163, 287–303. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.12.034>
- Lapworth, D. J., Kinniburgh, D. G., Stuart, M. E., & Ward, R. S. (2019). Emerging organic contaminants in groundwater: A global perspective. *Hydrogeology Journal*, 27, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1841-8>
- Leusch, F. D. L., Neale, P. A., Arnal, C., Aneck-Hahn, N. H., Balaguer, P., Bruchet, A., Escher, B. I., Esperanza, M., Grimaldi, M., Leroy, G., Scheurer, M., Schlichting, R., Schriks, M., & Hebert, A. (2019). Analysis of endocrine activity in drinking water, surface water and treated wastewater from six countries. *Water Research*, 139, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.10.056>
- Loos, R., Carvalho, R., António, D. C., Comero, S., Locoro, G., Tavazzi, S., Paracchini, B., Ghiani, M., Lettieri, T., Blaha, L., Jarosova, B., & Voorspoels, S. (2018). EU-wide monitoring survey on emerging polar organic contaminants in wastewater treatment plant effluents. *Water Research*, 47, 6475–6487.
- Loos, R., Wollgast, J., Huber, T., & Hanke, G. (2010). Polar herbicides, pharmaceutical products, perfluorinated compounds, and other emerging contaminants in groundwater in Europe. *Environmental Pollution*, 158(10), 2871–2883. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.06.018>
- Luo, Y., Guo, W., Ngo, H. H., Nghiem, L. D., Hai, F., Zhang, J., Liang, S., & Wang, X. (2014). A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. *Science of the Total Environment*, 473–474, 619–641.
- Malaj, E., von der Ohe, P. C., Grote, M., Kühne, R., Mondy, C. P., Usseglio-Polatera, P., Brack, W., & Schäfer, R. B. (2014). Organic chemicals jeopardize the

- health of freshwater ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111, 9549–9554.
- Mendoza-Lera, C., & Datry, T. (2017). Relating hydraulic conductivity and hyporheic zone biogeochemical processing to substrate composition. *Water Resources Research*, 53(5), 3993–4010. <https://doi.org/10.1002/2016WR019926>
- Michael, I., Rizzo, L., McArdell, C. S., Manaia, C., Merlin, C., Schwartz, T., Dagot, C., & Fatta-Kassinos, D. (2013). Urban wastewater treatment plants as hotspots for the release of antibiotics in the environment. *Water Research*, 47, 957–995.
- Pal, A., Gin, K. Y., Lin, A. Y., & Reinhard, M. (2010). Impacts of emerging organic contaminants on freshwater resources. *Environment International*, 36, 90–104.
- Postigo, C., & Barceló, D. (2015). Synthetic organic compounds and their transformation products in groundwater: Occurrence, fate and mitigation. *Science of the Total Environment*, 503–504, 32–47. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.019>
- Resmî Gazete. (2004). Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği. Resmî Gazete Sayı: 25687.
- Resmî Gazete. (2012). Yeraltı Sularının Kirlenmeye ve Bozulmaya Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik. Resmî Gazete.
- Resmî Gazete. (2016). Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği. Resmî Gazete.
- Richardson, S. D., & Kimura, S. Y. (2017). Emerging environmental contaminants: Challenges facing our next generation and potential engineering solutions. *Environmental Technology & Innovation*, 8, 40–56.
- Richardson, S. D., & Ternes, T. A. (2018). Water analysis: Emerging contaminants and current issues. *Analytical Chemistry*, 90, 398–428.
- Rochman, C. M., Hoh, E., Kurobe, T., & Teh, S. J. (2013). Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress. *Scientific Reports*, 3, 3263. <https://doi.org/10.1038/srep03263>
- Rodgers-Gray, T. P., Jobling, S., Morris, S., Kelly, C., Kirby, S., Janbakhsh, A., Harries, J. E., Waldock, M. J., Sumpter, J. P., & Tyler, C. R. (2000). Long-term temporal changes in the estrogenic composition of treated sewage effluent and their biological effects on fish. *Environmental Science & Technology*, 34(8), 1521–1528. <https://doi.org/10.1021/es991059c>
- Rodriguez-Narvaez, O. M., Peralta-Hernandez, J. M., Goonetilleke, A., & Bandala, E. R. (2017). Treatment technologies for emerging contaminants in water: A review. *Chemical Engineering Journal*, 323, 361–380.

- Schwarzenbach, R. P., Egli, T., Hofstetter, T. B., von Gunten, U., & Wehrli, B. (2010). Global water pollution and human health. *Annual Review of Environment and Resources*, 35, 109–136.
- Schwarzenbach, R. P., Escher, B. I., Fenner, K., Hofstetter, T. B., Johnson, C. A., von Gunten, U., & Wehrli, B. (2006). The challenge of micropollutants in aquatic systems. *Science*, 313(5790), 1072–1077.
- Shannon, M. A., Bohn, P. W., Elimelech, M., Georgiadis, J. G., Marinas, B. J., & Mayes, A. M. (2008). Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*, 452, 301–310.
- Smedley, P. L., & Kinniburgh, D. G. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17(5), 517–568. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00018-5)
- Snyder, S. A., Westerhoff, P., Yoon, Y., & Sedlak, D. L. (2007). Pharmaceuticals, personal care products, and endocrine disruptors in water. *Environmental Engineering Science*, 24, 449–469.
- Sophocleous, M. (2002). Interactions between groundwater and surface water: The state of the science. *Hydrogeology Journal*, 10, 52–67.
- Sousa, J. C. G., Ribeiro, A. R., Barbosa, M. O., Pereira, M. F. R., & Silva, A. M. T. (2018). A review on environmental monitoring of water organic pollutants identified by EU guidelines. *Journal of Hazardous Materials*, 344, 146–162. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.09.058>
- Stackelberg, P. E., Furlong, E. T., Meyer, M. T., Zaugg, S. D., Henderson, A. K., & Reissman, D. B. (2004). Persistence of pharmaceutical compounds in treated municipal wastewater. *Environmental Science & Technology*, 38, 4138–4144.
- Stuart, M. E., Lapworth, D. J., Crane, E. J., & Hart, A. (2012). Review of risk from potential emerging contaminants in UK groundwater. *Science of the Total Environment*, 416, 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.11.072>
- Sumpter, J. P., & Jobling, S. (2013). The occurrence, causes, and consequences of estrogens in the aquatic environment. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 32, 249–251.
- Sumpter, J. P., & Johnson, A. C. (2005). Lessons from endocrine disruption and their application to other issues concerning trace organics in the aquatic environment. *Environmental Science & Technology*, 39, 4321–4332.
- Ternes, T. A. (1998). Occurrence of drugs in German sewage treatment plants and rivers. *Water Research*, 32, 3245–3260.

- Ternes, T. A., Joss, A., & Siegrist, H. (2004). Scrutinizing pharmaceuticals and personal care products in wastewater treatment. *Environmental Science & Technology*, 38(20), 392A–399A. <https://doi.org/10.1021/es040639t>
- Tran, A. K. T., Yu, R. M. K., Islam, R., Nguyen, T. H. T., Bui, T. L. H., Kong, R. Y. C., O'Connor, W. A., Leusch, F. D. L., Andrew-Priestley, M., & MacFarlane, G. R. (2019). The utility of vitellogenin as a biomarker of estrogenic endocrine disrupting chemicals in aquatic organisms. *Environmental Pollution*, 248, 1067–1078. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.02.070>
- Tran, N. H., Reinhard, M., & Gin, K. Y. H. (2018). Occurrence and fate of emerging contaminants in wastewater treatment plants. *Water Research*, 133, 243–255. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.029>
- TÜBİTAK. (2018). Türkiye’de su kaynaklarının korunması ve yönetimi üzerine araştırma raporları.
- UNESCO. (2009). *Integrated Water Resources Management in Action*. UNESCO Publishing.
- UNESCO. (2018). Groundwater and global change – Trends, opportunities and challenges. UNESCO Publishing, Paris.
- USEPA. (2015). Contaminant Candidate List 4 (CCL4). United States Environmental Protection Agency.
- Vandenberg, L. N., Colborn, T., Hayes, T., Heindel, J., Jacobs, D., Lee, D., Shioda, T., Soto, A., vom Saal, F., Welshons, W., Zoeller, R., & Myers, J. (2012). Hormones and endocrine-disrupting chemicals: Low-dose effects and nonmonotonic dose responses. *Endocrine Reviews*, 33, 378–455.
- Verlicchi, P., Al Aukidy, M., & Zambello, E. (2012). Occurrence of pharmaceutical compounds in urban wastewater: Removal, mass load and environmental risk. *Science of the Total Environment*, 429, 123–155.
- von Gunten, U. (2003). Ozonation of drinking water: Part II. Disinfection and by-product formation. *Water Research*, 37, 1469–1487.
- Vulliet, E., & Cren-Olivé, C. (2011). Screening of pharmaceuticals and hormones in surface and groundwaters intended for human consumption. *Environmental Pollution*, 159(10), 2929–2934. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.04.033>
- Vymazal, J. (2014). Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A review. *Ecological Engineering*, 73, 724–751.
- Wang, Z., Li, R., Wu, F., Feng, C., Ye, C., & Yan, C. (2017). Estrogenic compound profiles in an urbanized coastal bay and potential ecological risks. *Marine*

- WHO. (2011). *Pharmaceuticals in drinking-water*. WHO Press, Geneva.
- WHO. (2017). *Guidelines for Drinking-water Quality (4th ed.)*. World Health Organization.
- WHO. (2018). *Guidelines for safe recreational water environments*. World Health Organization.
- Winter, T. C., Harvey, J. W., Franke, O. L., & Alley, W. M. (1998). *Ground Water and Surface Water: A Single Resource*. U.S. Geological Survey Circular 1139.



BÖLÜM 8

Bisfenol A'nın *Phanerochaete* *Chrysosporium* Kullanılarak Biyoremediasyonu

***Nuran Cıkcıkoğlu Yıldırım¹ &
Gokhan Onder Erguven² & Mehtap Tanyol³ &
Büşra Korkut⁴***

1. GİRİŞ

1.1.Endüstriyel Kimyasallar ve Çevresel Kirlilik

Sanayileşmenin hız kazanmasıyla birlikte endüstriyel kimyasalların üretimi ve kullanımı küresel ölçekte önemli ölçüde artmıştır. Ancak endüstriyel kimyasalların üretim, kullanım ve bertaraf süreçlerinde çevreye kontrolsüz şekilde salınmaları; hava, su ve toprak kirliliği gibi ciddi çevresel sorunlara yol açmaktadır (Manahan, 2011).

Endüstriyel kimyasalların çevresel ortamlara ulaşması; endüstriyel atık sular, emisyonlar, katı atıklar ve sızıntılar yoluyla gerçekleşmektedir. Bu kimyasalların bir kısmı doğada biyolojik, kimyasal veya fotokimyasal süreçlerle parçalanabilirken, önemli bir bölümü çevresel ortamlarda uzun süre kalıcılık gösterebilmektedir (Schwarzenbach et al., 2006).

Çevrede biriken endüstriyel kimyasallar, besin zinciri yoluyla biyolojik birikim ve biyomagnifikasyona neden olarak ekosistem dengesini bozmakta ve insan sağlığı açısından risk oluşturmaktadır. Bu kirleticiler; kanserojenite, mutajenite, nörotoksisite ve endokrin sistem bozuklukları gibi uzun vadeli etkilere yol açabilmektedir (Landrigan et al., 2018).

¹ Prof. Dr., Munzur Üniversitesi, Tunceli Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Tıbbi Dokümantasyon e Sekreterlik Pr, Tunceli Türkiye
ORCID:0000-0003-3975-6705

² Prof. Dr., Munzur Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Siyaset Bilimi ve Kamu Yönetimi Bölümü, Kentleşme ve Çevre Sorunları ABD, Tunceli, Türkiye
ORCID: 0000-0003-1573-080X

³ Prof. Dr., Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Geoteknik Anabilim Dalı, Tunceli, Türkiye
ORCID:0000-0002-3848-2581

⁴ Munzur Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Tunceli, Türkiye

Geleneksel fiziksel ve kimyasal arıtma yöntemleri, endüstriyel kimyasalların gideriminde her zaman yeterli olmamakta; yüksek maliyet, ikincil atık oluşumu ve sınırlı verimlilik gibi dezavantajlar içermektedir. Bu durum, çevre dostu ve sürdürülebilir alternatif arıtma yöntemlerinin geliştirilmesini gerekli kılmıştır (Vidali, 2001).

Bu bileşiklerin büyük bir kısmı, kimyasal yapıları nedeniyle çevresel ortamlarda uzun süre kalıcılık gösterebilmekte ve düşük konsantrasyonlarda dahi biyolojik etki oluşturabilmektedir. Endokrin bozucu bileşiklerin en dikkat çekici özelliklerinden biri, klasik toksik maddelerden farklı olarak doz-etki ilişkisinin doğrusal olmaması ve özellikle gelişimsel dönemlerde (fetüs, bebeklik ve ergenlik) daha ciddi etkiler ortaya koyabilmesidir (Gore et al., 2015).

Geleneksel atıksu arıtma sistemleri, endokrin bozucu bileşiklerin çevresel ortamlardan tamamen uzaklaştırılmasında yetersiz kalabilmektedir. Bu durum, EDC'lerin alıcı ortamlara taşınmasına ve çevresel risklerin artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle endokrin bozucu bileşiklerin giderimine yönelik çevre dostu, etkili ve sürdürülebilir arıtma yöntemlerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda biyoremediasyon uygulamaları, EDC'lerin çevresel etkilerinin azaltılmasında umut verici bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir.

1.2.Bisphenol A'nın (BPA) Tanımı ve Özellikleri

Bisphenol A'nın moleküler formülü $C_{15}H_{16}O_2$, moleküler ağırlığı ise yaklaşık 228,29 g/mol'dür. Yapısında iki adet fenolik halka ve bu halkaları birbirine bağlayan izopropiliden grubu bulunmaktadır. Bu fenolik yapı, BPA'ya östrojen benzeri biyolojik aktivite kazandırmakta ve endokrin bozucu özelliklerinin temelini oluşturmaktadır (Rubin, 2011).

Kimyasal olarak BPA, çevresel ortamlarda hidroliz ve fotoliz gibi süreçlere karşı nispeten dayanıklıdır. Bu durum, BPA'nın sucul ve karasal ortamlarda kalıcılığını artırmakta ve çevresel bir kirletici olarak önem kazanmasına neden olmaktadır. BPA'nın pKa değerinin yaklaşık 9,6–10,2 aralığında olması, çevresel pH koşullarına bağlı olarak iyonlaşma davranışını etkilemekte ve bu durum BPA'nın taşınımı ve biyoyararlanımı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır (Yamamoto et al., 2001).

Bisfenol A (BPA), sahip olduğu kimyasal dayanıklılık, ısıya karşı direnç ve mekanik mukavemet kazandırma özellikleri nedeniyle birçok endüstriyel uygulamada yaygın olarak kullanılan sentetik bir organik bileşiktir. Küresel BPA üretiminin büyük bir bölümü polimer ve reçine endüstrisinde hammadde olarak değerlendirilmektedir. Geniş endüstriyel kullanım alanları, BPA'nın üretimden atık aşamasına kadar çevresel ortamlara yayılmasına neden olmakta ve BPA'yı önemli bir çevresel kirletici haline getirmektedir.

Bisfenol A (BPA), yaygın endüstriyel kullanımı nedeniyle üretim, kullanım ve bertaraf süreçlerinin her aşamasında çevresel ortamlara salınabilmektedir. BPA'nın çevresel yayılımı başlıca endüstriyel atıksular, evsel atıklar, katı atık depolama sahaları ve tüketici ürünlerinden sızıntı yoluyla gerçekleşmektedir. Bu durum BPA'nın sucul ve karasal ortamlarda yaygın olarak tespit edilen bir çevresel mikrokirletici haline gelmesine neden olmaktadır (Staples et al., 1998).

Katı atık depolama alanları da BPA'nın çevresel yayılımında önemli rol oynamaktadır. BPA içeren plastik ürünlerin zamanla bozunması sonucu oluşan sızıntı suları, BPA'nın toprak ve yeraltı sularına geçmesine neden olmaktadır. Özellikle düzenli depolama sahalarından kaynaklanan sızıntı sularında BPA varlığı yaygın olarak rapor edilmiştir (Yamamoto et al., 2001).

1.3. Ekosistemler Üzerindeki BPA Maruziyeti

BPA'nın çevresel yayılımı yalnızca insanlar için değil, aynı zamanda sucul ve karasal organizmalar için de ciddi bir risk oluşturmaktadır. BPA, sucul ekosistemlerde balıklar, omurgasızlar ve algler üzerinde üreme, gelişim ve davranış bozukluklarına neden olabilmektedir. Bu etkiler, BPA'nın çevresel ortamlardan etkin bir şekilde giderilmesini gerekli kılmaktadır.

1.4. Bisfenol A'nın İnsan Sağlığı Üzerine Etkileri

Bisfenol A (BPA), östrojen hormonuna yapısal benzerliği nedeniyle insanlarda endokrin bozucu etki gösteren önemli bir çevresel kimyasaldır. BPA, hormon reseptörlerine bağlanarak veya hormon sentezi, taşınması ve metabolizmasını değiştirerek endokrin sistemin normal işleyişini bozabilmektedir. Düşük konsantrasyonlarda dahi biyolojik etki gösterebilmesi, BPA'yı insan sağlığı açısından özel bir risk faktörü haline getirmektedir (Rubin, 2011).

1.5. Bisfenol A'nın Ekotoksikolojik Etkileri

Bisfenol A (BPA), çevresel ortamlarda yaygın olarak bulunan ve sucul ile karasal ekosistemlerde yaşayan organizmalar üzerinde toksik ve subletal etkilere neden olabilen önemli bir endokrin bozucu bileşiktir. BPA'nın düşük konsantrasyonlarda dahi biyolojik sistemleri etkileyebilmesi, ekotoksikolojik açıdan bu bileşiğin çevresel riskinin yüksek olduğunu göstermektedir. Atıksu arıtma tesislerinden alıcı ortamlara deşarj edilen BPA, özellikle sucul ekosistemlerde biyolojik dengeyi olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

BPA'nın ekotoksikolojik etkileri en belirgin şekilde sucul organizmalar üzerinde gözlenmektedir. Balıklar üzerinde yapılan çalışmalarda BPA maruziyetinin endokrin sistemi bozarak üreme fonksiyonlarında azalma, cinsiyet oranlarında değişim ve vitellogenin sentezinde artışa yol açtığı rapor edilmiştir.

Bu durum, BPA'nın östrojenik etkisinin sucul organizmalar üzerinde güçlü olduğunu ortaya koymaktadır (Kang et al., 2007).

Alg ve fitoplankton türlerinde BPA'nın fotosentetik aktiviteyi baskıladığı, hücresel büyümeyi azalttığı ve oksidatif stres oluşumuna neden olduğu bildirilmiştir. Zooplankton ve kabuklu canlılarda ise gelişimsel gecikmeler, davranış değişiklikleri ve mortalite artışı gözlenmiştir. Bu etkiler, BPA'nın sucul besin zincirinin farklı trofik seviyelerinde ekotoksik etki gösterebildiğini ortaya koymaktadır (Staples et al., 2018).

BPA, arıtma çamurlarının tarımsal alanlarda kullanımı ve plastik atıkların çevresel bozunumu yoluyla toprak ekosistemlerine taşınabilmektedir. Toprak mikroorganizmaları üzerinde yapılan çalışmalar, BPA'nın mikrobiyal çeşitliliği azalttığını ve toprak enzim aktivitelerini baskıladığını göstermektedir. Bu durum, toprakta madde döngüsü ve organik maddenin parçalanma süreçlerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Chen et al., 2016).

Toprak omurgasızları üzerinde BPA maruziyetinin büyüme geriliği, üreme başarısında azalma ve oksidatif stres artışına neden olduğu rapor edilmiştir. Bu bulgular, BPA'nın yalnızca sucul değil, karasal ekosistemler için de potansiyel bir çevresel tehdit oluşturduğunu göstermektedir.

1.6. BPA'nın Çevresel Ortamlardaki Davranışı ve Kalıcılığı

Bisfenol A (BPA), yaygın endüstriyel kullanımı ve sürekli çevresel girdileri nedeniyle çevresel ortamlarda farklı fizikokimyasal süreçlere maruz kalan önemli bir organik kirletici olarak değerlendirilmektedir. BPA'nın çevresel davranışı; çözünürlük, adsorpsiyon, bozunma ve biyolojik etkileşimler gibi süreçlerle şekillenmekte, bu süreçler BPA'nın çevresel kalıcılığını ve ekolojik risk potansiyelini doğrudan etkilemektedir.

BPA, sucul ortamlarda orta derecede çözünürlük göstermekte ve çözünmüş faz ile askıda katı maddeler arasında dağılım sergilemektedir. Suyun pH değeri, sıcaklığı ve çözünmüş organik madde içeriği BPA'nın davranışını belirleyen başlıca faktörlerdir. BPA, özellikle çözünmüş organik maddelere ve askıda katı partiküllere adsorbe olarak su kolonundan sedimentlere taşınabilmektedir. Bu durum, sucul sistemlerde sedimentlerin BPA için önemli bir birikim ortamı hâline gelmesine neden olmaktadır (Staples et al., 2018).

Atıksu arıtma tesislerinden deşarj edilen BPA, arıtma veriminin sınırlı olması nedeniyle alıcı ortamlarda sürekli bir kirletici yükü oluşturmaktadır. Bu sürekli giriş, BPA'nın çevresel ortamlardaki varlığını ve kronik maruziyet riskini artırmaktadır.

BPA'nın hidrofobik karakteri, bu bileşiğin sediment ve toprak ortamlarına bağlanma eğilimini artırmaktadır. Sedimentlerde organik madde içeriğinin

yüksek olması, BPA'nın burada daha uzun süre kalmasına yol açabilmektedir. Sedimentler, çevresel koşulların değişmesi durumunda BPA'yı yeniden su kolonuna salarak ikincil bir kirlilik kaynağı hâline gelebilmektedir.

Toprak ortamlarında BPA'nın davranışı; toprak yapısı, pH, nem oranı ve mikrobiyal aktiviteye bağlı olarak değişmektedir. Mikrobiyal bozunmanın sınırlı olduğu koşullarda BPA'nın toprakta kalıcılığı artmakta ve uzun süreli çevresel risk oluşturmaktadır (Chen et al., 2016).

BPA'nın uçuculuğu düşük olmakla birlikte, atmosferde partikül maddeye adsorbe olarak taşınabildiği bildirilmektedir. Bu mekanizma, BPA'nın özellikle kentsel ve endüstriyel bölgelerde atmosferik çökeltme yoluyla toprak ve su ortamlarına dolaylı girişi neden olmaktadır. Böylece BPA, yalnızca lokal değil, bölgesel ölçekte de çevresel yayılım gösterebilmektedir.

1.7. Kirleticilerin Giderim Yöntemleri

Sanayileşme, kentleşme ve artan tüketim faaliyetleri sonucunda çevresel ortamlara salınan organik ve inorganik kirleticiler, su, toprak ve hava ekosistemleri üzerinde ciddi baskılar oluşturmaktadır. Bu kirleticilerin çevresel ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla farklı fiziksel, kimyasal ve biyolojik giderim yöntemleri geliştirilmiştir. Kirleticinin türü, konsantrasyonu, çevresel ortam ve ekonomik faktörler, uygulanacak giderim yönteminin seçiminde belirleyici olmaktadır.

1.8. Biyoremediasyon Kavramı

Biyoremediasyon, çevresel ortamlarda bulunan kirleticilerin mikroorganizmalar, bitkiler veya enzimler aracılığıyla daha az toksik, zararsız ya da mineralize olmuş formlara dönüştürülmesini amaçlayan çevre dostu bir arıtım yaklaşımıdır. Bu yöntem, doğal biyolojik süreçlerden yararlanarak toprak, su ve sediment gibi çevresel matrislerdeki organik ve inorganik kirleticilerin giderilmesini hedefler. Biyoremediasyonun temel avantajları arasında düşük maliyet, çevreyle uyumlu olması ve ikincil kirlenme riskinin görece düşük olması yer almaktadır (Vidali, 2001).

Biyoremediasyon süreçleri, canlı organizmaların metabolik faaliyetlerine dayanmaktadır. Mikroorganizmalar, kirleticileri karbon ve enerji kaynağı olarak kullanabilir veya bu bileşikleri enzimatik reaksiyonlar yoluyla dönüştürebilir. Bu süreçler aerobik ya da anaerobik koşullarda gerçekleşebilir. Özellikle lignin parçalayıcı enzim sistemlerine sahip beyaz çürükçül mantarlar, geniş spektrumlu organik kirleticilerin bozunmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda *Phanerochaete chrysosporium*, lignin peroksidaz, mangan peroksidaz ve lakaz gibi enzimleri sayesinde endokrin bozucu bileşiklerin gideriminde yaygın olarak çalışılan bir model organizma haline gelmiştir (Pointing, 2001).

Son yıllarda biyoremediasyon, özellikle kalıcı organik kirleticiler (POPs), pestisitler, farmasötik kalıntılar ve endokrin bozucu bileşikler gibi çevresel açıdan riskli maddelerin gideriminde sürdürülebilir bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Gelişen biyoteknolojik yaklaşımlar sayesinde genetik olarak iyileştirilmiş mikroorganizmalar, enzim bazlı sistemler ve kombine arıtım teknolojileri üzerinde yoğun araştırmalar yürütülmektedir (Gadd, 2010).

Artan endüstriyel faaliyetler ve kimyasal kullanımı sonucu çevrede biriken toksik maddeler, geleneksel fiziksel ve kimyasal arıtma yöntemleriyle her zaman etkin şekilde giderilememektedir. Bu nedenle biyoremediasyon, özellikle Bisfenol A gibi düşük konsantrasyonlarda dahi biyolojik etki gösterebilen kirleticilerin uzaklaştırılmasında önemli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Beyaz çürükçül mantarların kullanıldığı biyoremediasyon uygulamaları, BPA'nın çevresel ortamlardan uzaklaştırılmasında umut vadeden bir yaklaşım sunmaktadır.

Mikroorganizmalarla biyoremediasyon, çevresel ortamlarda bulunan kirleticilerin bakteri, mantar ve alg gibi mikroorganizmalar tarafından metabolize edilerek daha az toksik bileşiklere dönüştürülmesi veya tamamen mineralize edilmesini esas alan sürdürülebilir bir arıtma yaklaşımıdır. Mikroorganizmalar, sahip oldukları enzimatik sistemler sayesinde çok çeşitli organik ve inorganik kirleticileri karbon ve enerji kaynağı olarak kullanabilmekte ya da ko-metabolik yollarla parçalayabilmektedir.

Mantarlar, özellikle lignin parçalayıcı enzim sistemlerine sahip türler sayesinde dirençli organik kirleticilerin gideriminde önemli avantajlar sunmaktadır. Beyaz çürükçül mantarlar tarafından üretilen lignin peroksidaz (LiP), mangan peroksidaz (MnP) ve lakkaz gibi enzimler, geniş substrat özgüllüğüne sahip olup endokrin bozucu bileşikler, boya maddeleri ve fenolik kirleticilerin oksidatif bozunmasını gerçekleştirebilmektedir. Phanerochaete chrysosporium, Bisfenol A'nın biyolojik gideriminde enzimatik etkinliği en iyi tanımlanmış mantar türlerinden biridir.

1.9. Mantarların Biyoremediasyondaki Rolü

Mantar temelli biyoremediasyon uygulamaları; endüstriyel atık suların arıtımı, boya ve tekstil endüstrisi atıkları, pestisitler, plastik katkı maddeleri ve farmasötik kalıntıların giderimi gibi geniş bir alanda kullanılmaktadır. BPA gibi kalıcı ve toksik kirleticilerin gideriminde mantarların kullanılması, sürdürülebilir çevre yönetimi açısından umut verici bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir.

Mantarlar, sahip oldukları geniş enzimatik kapasiteleri ve çevresel stres koşullarına karşı dayanıklılıkları nedeniyle biyoremediasyon uygulamalarında önemli biyolojik ajanlar arasında yer almaktadır. Özellikle kompleks ve toksik yapıları organik kirleticilerin gideriminde, mantarların bakterilere kıyasla daha

etkin olabildiği birçok çalışmada rapor edilmiştir. Bu özellikleri sayesinde mantarlar, endüstriyel atık sular, kirlenmiş topraklar ve sucul ekosistemlerin arıtımında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Beyaz çürükçül mantarlar, doğal lignin bozunma süreçlerinde görev alan ve lignoselülozik materyali mineralize edebilen mikroorganizmalardır. Bu mantarlar tarafından üretilen lignin peroksidaz (LiP), mangan peroksidaz (MnP) ve lakkaz gibi oksidatif enzimler, düşük özgülükleri sayesinde çok çeşitli organik kirleticilerin parçalanmasını mümkün kılmaktadır. Endokrin bozucu bileşikler, boya maddeleri, fenolik bileşikler ve poliaromatik hidrokarbonlar bu enzimler tarafından oksidatif yolla dönüştürülebilmektedir.

Mantarların biyoremediasyondaki en önemli avantajlarından biri, fenolik yapıya sahip ve çevresel açıdan dirençli bileşiklerin gideriminde gösterdikleri yüksek etkinliktir. Bisfenol A gibi endokrin bozucu bileşiklerin yapısında bulunan aromatik halkalar, mantar enzimleri tarafından oksidatif olarak parçalanabilmektedir. *Phanerochaete chrysosporium*, BPA'nın biyolojik bozunmasında sıklıkla kullanılan ve yüksek giderim verimi rapor edilen bir beyaz çürükçül mantar türüdür.

Mantarlarla biyoremediasyonun başlıca avantajları arasında; geniş substrat özgülüğü, düşük maliyet, çevre dostu olması ve toksik ara ürünlerin oluşumunun sınırlı olması yer almaktadır. Bununla birlikte, mantarların büyüme hızlarının bakterilere göre daha yavaş olması, çevresel koşullara duyarlılıkları ve bazı uygulamalarda ölçek büyütme zorlukları bu yaklaşımın sınırlılıkları arasında değerlendirilmektedir.

1.10. *Phanerochaete chrysosporium*'un Genel Özellikleri

P. chrysosporium, Polyporales takımı ve Phanerochaetaceae familyası içerisinde sınıflandırılmaktadır. Kolonileri hızlı büyüyen, pamuksu yapıda ve beyaz renkli olup, hifleri septalı ve dallanmış yapıdadır. Spor oluşumu sınırlı olmakla birlikte, miselyal gelişimi güçlüdür ve geniş yüzey alanı sayesinde substratlarla etkin temas sağlayabilmektedir.

Bu mantar türü, aerobik koşullarda optimum büyüme göstermekte ve özellikle azot sınırlı ortamlarda lignin parçalayıcı enzim üretimini artırmaktadır. Optimum büyüme sıcaklığı genellikle 35–39 °C aralığında olup, pH açısından geniş bir tolerans aralığına sahiptir. *P. chrysosporium*, karbon ve enerji kaynağı olarak lignoselülozik bileşikleri kullanabilme kapasitesiyle dikkat çekmektedir.

Phanerochaete chrysosporium'un biyoremediasyon açısından en önemli özelliği, güçlü ve non-spesifik oksidatif enzim sistemine sahip olmasıdır. Lignin peroksidaz (LiP) ve mangan peroksidaz (MnP) başta olmak üzere ürettiği enzimler, aromatik ve fenolik yapıdaki çok sayıda organik kirleticinin

parçalanmasında rol oynamaktadır. Bu enzimler, düşük substrat özgülükleri sayesinde Bisfenol A gibi endokrin bozucu bileşiklerin oksidatif bozunmasını mümkün kılmaktadır.

Phanerochaete chrysosporium, biyoremediasyon alanında en yaygın çalışılan beyaz çürükçül mantarlardan biri olup, özellikle ligninolitik enzim sistemi sayesinde çevresel açıdan dirençli organik kirleticilerin gideriminde yüksek potansiyel göstermektedir. Literatürde yapılan çalışmalar, bu mantarın fenolik bileşikler, endokrin bozucu maddeler, boya maddeleri, poliaromatik hidrokarbonlar (PAH'lar), pestisitler ve bazı klorlu organik bileşiklerin biyolojik bozunmasında etkin rol oynadığını ortaya koymaktadır. *P. chrysosporium* tarafından üretilen lignin peroksidaz (LiP) ve mangan peroksidaz (MnP) gibi non-spesifik oksidatif enzimler, aromatik halkalara sahip kirleticilerin parçalanmasını mümkün kılmakta ve bu sayede Bisfenol A gibi endokrin bozucu bileşiklerin çevresel ortamlardan uzaklaştırılmasına katkı sağlamaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarda, BPA'nın hem saf kültür koşullarında hem de immobilize fungal sistemlerde önemli oranlarda giderildiği; ayrıca mantar temelli biyoremediasyonun ileri oksidasyon süreçleriyle kombine edilmesi durumunda giderim veriminin daha da arttığı bildirilmektedir. Bunun yanı sıra, *P. chrysosporium*'un ko-metabolik mekanizmalar yoluyla doğrudan enerji kaynağı olmayan kirleticileri de dönüştürebilmesi, bu organizmayı kompleks ve karma kirlenmiş ortamların arıtımı için uygun bir biyolojik ajan hâline getirmektedir. Bu bulgular, *P. chrysosporium*'un sürdürülebilir ve çevre dostu biyoremediasyon uygulamalarında önemli bir rol oynadığını göstermektedir.

1.11. Çalışmanın Amacı ve Önemi

Bu çalışma, beyaz çürükçül bir mantar olan *Phanerochaete chrysosporium* kullanılarak çevresel açıdan dirençli organik kirleticilerin biyoremediasyon yoluyla gideriminin optimize edilmesini amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında, biyoremediasyon sürecini etkileyen temel işletme parametrelerinin (örneğin, başlangıç bisphenol fenol A konsantrasyonu, inkübasyon süresi, Pelet miktarı) etkileşimli etkilerinin değerlendirilmesi için Yanıt Yüzey Metodolojisi (Response Surface Methodology, RSM) temelli deneysel tasarım yaklaşımı kullanılmıştır. RSM, deney sayısını minimize ederken çok değişkenli sistemlerde optimum çalışma koşullarının istatistiksel olarak tahmin edilmesine olanak sağlayan güçlü bir optimizasyon aracıdır.

Bu bağlamda çalışmanın temel amacı, *P. chrysosporium*'un biyoremediasyon potansiyelini yalnızca tek değişkenli yaklaşımlar ile değil, faktörler arası etkileşimleri de dikkate alan bütüncül bir modelleme yaklaşımıyla ortaya koymaktır. RSM kullanımı sayesinde, deneysel süreçler önceden tahmin edilebilir hâle getirilmiş; zaman, maliyet ve kaynak kullanımında önemli ölçüde tasarruf sağlanmıştır. Ayrıca geliştirilen matematiksel modeller aracılığıyla,

biyoremediasyon verimi üzerinde en etkili parametreler belirlenmiş ve süreç performansı istatistiksel olarak doğrulanabilir şekilde değerlendirilmiştir.

Çalışmanın önemi, biyoremediasyon gibi biyolojik temelli ve doğası gereği değişkenlik içeren bir sürecin, sistematik ve öngörülebilir bir optimizasyon yöntemi ile desteklenmiş olmasından kaynaklanmaktadır. *P. chrysosporium*'un geniş substrat özgüllüğüne sahip ligninolitik enzim sistemi ile RSM'nin sunduğu çok değişkenli analiz yaklaşımının birlikte kullanılması, çevre dostu ve sürdürülebilir arıtma teknolojilerinin geliştirilmesi açısından önemli bir katkı sunmaktadır. Bu yönüyle çalışma, hem biyoremediasyon literatürüne metodolojik bir yaklaşım kazandırmakta hem de endüstriyel ve çevresel uygulamalara aktarılabilir nitelikte sonuçlar üretmektedir.

2. Materyal Metot

2.1. *P. Chrysosporium* mantarlarının hazırlanması

Çalışmada öncelikle Çevre Mühendisliği Bölümü laboratuvarındaki dolapta +4°C' de halihazırda agar besi yerinde bulunan *P. Chrysosporium* beyaz çürükçül mantarları, sabouraud dextrose agar besi yerinde steril şartlarda ekimi yapılarak 27 °C' da çoğaltılmıştır. Bu işlemler ardından 150 rpm' de 120 saat botunca pelet oluşuncaya kadar yine 27 °C' de çalkalayıcı inkübatörde alkalanmıştır. Oluşan peletler biyoremediasyon faaliyetleri için tekrar +4°C' de buz dolabına alınmıştır.

2.2. Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) çalışmaları

Biyoremediasyon faaliyetleri KOİ parametresi ile yürütülmüştür. KOİ deneyleri Standard Metod 5220B Kapalı reflüks yöntemi ile belirlenmiştir. Bu çalışma için yanıt yüzey yöntemi (YYY) kullanılarak, çalışılacak olan Bisphenol A miktarı, *P. Chrysosporium* miktarı ve biyoremediasyon faaliyetinin gerçekleşeceği süreler belirlenmiştir. *P. Chrysosporium* miktarı 3 – 6,19 mg; Çalkalanma süresi (*P. Chrysosporium* ile Bisphenol-A' nın giderimi için gerekli olan süresi) 1,81 – 5 Gün; ve son olarak Bisphenol – A miktarı da 50-200 mg arasında seyretmektedir. Söz konusu parametrelerdeki YYY girdileri, Tablo 2.1' de verilmiştir.

Tablo 2.1. Biyoremediasyon faaliyetleri için YYY girdileri

Run	<i>P. chrysosporium</i> miktarı (mg)	Süre (Gün)	Bisphenol A (mg/L)
1	6,19	4,19	169,6
2	6,19	1,81	169,6
3	5	3	125
5	7	3	125
7	5	3	50
8	3,81	1,81	169,6

11	3,81	4,19	169,6
12	3	3	125
13	5	3	200
14	3,81	1,81	80,4
15	6,19	4,19	80,4
17	5	5	125
18	6,19	1,81	80,4
19	5	1	125
20	3,81	4,19	80,4

2.3. Yanıt Yüzey Yöntemi ile Deneysel Dizayn

Yanıt yüzey yöntemi (YYY), regresyon modeli denklemlerini ve çalışma koşullarını belirlemek için deneylerden elde edilen nicel verileri kullanan istatistiksel bir yöntemdir. YYY kullanılarak, farklı faktörlerin (işletme parametreleri) etkilerinin ve bunların adsorpsiyon kapasitesi üzerindeki etkileşimlerinin araştırılması, etkili faktörlerin belirlenmesi ve sürecin optimize edilmesi için ampirik model geliştirilmiştir. Tasarım, matematiksel modelleme ve optimizasyon için Design Expert 7.0 yazılımı (Stat-Ease Inc., ABD) uygulanmıştır. Yaygın olarak kullanılan tasarım türü olan merkezi kompozit tasarım (MKT), ikinci dereceden polinom modelini geliştirmek ve üç ana kontrol edilebilir değişkenin (faktörler) KOİ giderim verimi (çıkıtı yanıtı) üzerindeki etkisini incelemek için kullanılmıştır. Bu çalışmada seçilen bağımsız değişkenler; ıslak pellet miktarı (*A*), süre (*B*) ve başlangıç bisfenol A dozajıdır (*C*). Her faktör, Denklem (2.1)'e göre $-\alpha$, -1 , 0 , $+1$, $+\alpha$ beş seviyede kodlanmıştır.

$$x_i = \frac{X_i - X_0}{\Delta x} \quad (2.1)$$

Burada, x_i , i . bağımsız değişkenin boyutsuz kodlanmış değeri, X_i bağımsız değişkenin gerçek değeri, X_0 merkez noktada X_i 'nin değeri ve Δx interval değeridir.

Faktörlerin kodlanmış ve gerçek değerlerindeki deneysel aralıklar, Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.2. KOİ giderimi (%) için bağımsız faktörler ve seviyeleri

Faktörler	Aralık ve değerleri				
	$-\alpha(-1.682)$	-1	0	$+1$	$+\alpha(+1.682)$
<i>A</i> : Islak pellet miktarı, g	3	3.81	5	6.19	7
<i>B</i> : Süre (gün)	1	1.81	3	4.19	5

C: başlangıç bisfenol A dozajı (ppm)	50	80.40	125	169.60	200
--------------------------------------	----	-------	-----	--------	-----

Denklem (2.2) ile gösterildiği gibi bağımlı (KOİ giderimi (%)) ve bağımsız değişkenleri ilişkilendirmek için deneysel sonuç ifadesinin ikinci dereceden bir polinom yaklaşımı kullanılmıştır:

Denklem (5) ile gösterildiği gibi bağımlı (çıkarma verimliliği (%)) ve bağımsız değişkenleri ilişkilendirmek için deneysel sonuç ifadesinin ikinci dereceden bir polinom yaklaşımı da kullanıldı.

A quadratic polynomial approximation of the experimental result expression was also used to relate the dependent (subtraction efficiency (%)) and independent variables as shown by equation (5).

Denklem (5)'te gösterildiği gibi bağımlı (çıkarma verimliliği (%)) ve bağımsız değişkenleri ilişkilendirmek için deneysel sonuç ifadesinin ikinci mertebeden bir polinom yaklaşımı da kullanıldı.

A second-order polynomial approximation of the experimental result expression was also used to relate dependent (subtraction efficiency (%)) and independent variables as shown in equation (5).

Tam sonuçlar yüklenemiyor

Tekrar dene

Tekrar deneniyor...

Tekrar deneniyor...

$$Y(mg/g) = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} X_i X_j + e \quad (2.2)$$

Burada, Y , tahmin edilen yanıt (adsorpsiyon kapasitesi); β_0 , sabit katsayı; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$, lineer katsayılar; $\beta_{11}, \beta_{22}, \beta_{33}$, ikinci dereceden katsayılar; $\beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}$, etkileşim katsayıları ve e rastgele hatadır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Merkezi Kompozit Tasarım (MKT)

Bisfenol A giderimini optimize etmek için yanıt yüzey yöntemi (YYY) esaslı üç değişkenli bir merkezi kompozit tasarım kullanılmıştır. Islak pellet miktarı (A), süre (B) ve başlangıç bisfenol A dozajını (C) içeren bağımsız değişkenlerin, KOİ giderimi (Y , yanıt olarak) üzerindeki etkileşim etkileri MKT yaklaşımı kullanılarak araştırılmıştır. Bisfenol A giderimi için elde edilen giderim yüzdesi değerleri (%) Tablo 3.1’de verilmiştir. Yanıt ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişki Denklem (3.1) ile gösterilmiştir.

$$Y(\%) = + 82.99 - 0.43A - 0.022B + 3.03C + 2.78AB + 1.18AC + 1.18BC - 1,58A^2 - 1.00B^2 - 1,56C^2 \quad (3.1)$$

This showed that the applied model can be reliable in estimating the removal efficiency (%).

Bu, uygulanan modelin kaldırma verimliliğini (%) tahmin etmede güvenilir olabileceğini gösterdi.

This showed that the applied model can be reliable in estimating the lifting efficiency (%).

Tam sonuçlar yüklenemiyor

Tekrar dene

Tekrar deneniyor...

Tekrar deneniyor...

Parlak yeşil biyosorpsiyon faktörleri için tasarım matrisi ve deneylerden karşılık gelen yanıtlar

Design matrix for brilliant green biosorption factors and corresponding responses from experiments

Tam sonuçlar yüklenemiyor

Tekrar dene

Tekrar deneniyor...

Tekrar deneniyor...

Tablo 3.1. KOİ giderimi ve deneysel yanıtlar için tasarım matrisiParlak yeşil biyosorpsiyon faktörleri ve deneylerden gelen karşılık gelen yanıtlar için tasarım matrisiDesign matrix for bright green biosorption factors and corresponding responses from experiments

Sıra no	Faktörler			KOI giderimi (%)
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	
1	6.19	4.19	169.60	84.30
2	6.19	1.81	169.60	79.60
3	5.00	3.00	125.00	82.70
4	5.00	3.00	125.00	83.50
5	7.00	3.00	125.00	79.00
6	5.00	3.00	125.00	82.70
7	5.00	3.00	50.00	74.80
8	3.81	1.81	169.60	81.60
9	5.00	3.00	125.00	82.50
10	5.00	3.00	125.00	82.70
11	3.81	4.19	169.60	79.60
12	3.00	3.00	125.00	80.10
13	5.00	3.00	200.00	84.40
14	3.81	1.81	80.40	82.20
15	6.19	4.19	80.40	75.50
16	5.00	3.00	125.00	83.50
17	5.00	5.00	125.00	82.30
18	6.19	1.81	80.40	71.10
19	5.00	1.00	125.00	80.10
20	3.81	4.19	80.40	71.10

MKT modelinin istatistiksel önemi, varyans analizi (ANOVA) kullanılarak değerlendirilmiştir. Statistical significance of the CCD model was evaluated using analysis of variance (ANOVA).

CCD modelinin istatistiksel anlamlılığı, varyans analizi (ANOVA) kullanılarak değerlendirildi.

Statistical significance of the CCD model was evaluated using analysis of variance (ANOVA).

Tam sonuçlar yüklenemiyor

Tekrar dene

Tekrar deneniyor...

Tekrar deneniyor...

ANOVA sonuçları Tablo 3.2’de özetlenmiştir. Uygulanan modelin MKT ile tanımlanan tasarım alanında gezinmek için başarılı bir şekilde kullanılabileceği görülmüştür. ANOVA sonuçları Tablo 4’te özetlenmiştir. Uygulanan modelin CCD tarafından tanımlanan tasarım uzayında gezinmek için başarılı bir şekilde kullanılabileceği ortaya çıkmıştır.

ANOVA results are summarized in Table 4. It turns out that the applied model can be successfully used to navigate the design space defined by the CCD.

ANOVA’nın sonuçları Tablo 4’te özetlenmiştir. Uygulanan modelin CCD tarafından tanımlanan tasarım uzayında gezinmek için başarıyla kullanılabileceği ortaya çıkmıştır.

The results of the ANOVA are summarized in Table 4. It turns out that the applied model can be successfully used to navigate the design space defined by the CCD.

Tam sonuçlar yüklenemiyor

Tekrar dene

Tekrar deneniyor...

Tekrar deneniyor...

Tablo 3.2’ye göre, tahmin edilen ve deneysel giderim yüzdesi (%) arasında yüksek korelasyon katsayısı (0.9158) elde edilmiştir. Tablo 4’te getirilen verilere göre, tahmin edilen ve deneysel uzaklaştırma verimliliği (%) arasında yüksek korelasyon katsayıları (BG4 için $R^2 = 0.960$ ve BY28 için $R^2 = 0.927$) elde edilmiştir.

According to the data presented in Table 4, high correlation coefficients ($R^2 = 0.960$ for BG4 and $R^2 = 0.927$ for BY28) were obtained between the estimated and experimental removal efficiency (%).

Tablo 4’te getirilen verilere göre, öngörülen ve deneysel uzaklaştırma verimi (%) arasında yüksek korelasyon katsayıları (BG4 için $R^2 = 0.960$ ve BY28 için $R^2 = 0.927$) elde edilmiştir.

According to the data presented in Table 4, high correlation coefficients ($R^2 = 0.960$ for BG4 and $R^2 = 0.927$ for BY28) were obtained between predicted and experimental removal efficiency (%).

Tam sonuçlar yüklenemiyor

Tekrar dene

Tekrar deneniyor...

Tekrar deneniyor...

Bu, uygulanan modelin KOİ giderim yüzdesini (%) tahmin etmede güvenilir olabileceğini göstermiştir.

Tablo 3.2. Varyans analizi (ANOVA)

Kaynak	Sum of squares	DF	Mean square	F-değeri	p-değeri Prob >	
Model	283.60	9	31.51	12.09	0.0003	önemli
A- Islak pellet miktarı (g)	2.51	1	2.51	0.96	0.3500	
B- Süre (gün)	6.593E-003	1	6.593E-003	2.529E-003	0.9609	
C- Bisfenol A dozağı	125.17	1	125.17	48.02	<	
AB	61.61	1	61.61	23.64	0.0007	
AC	11.05	1	11.05	4.24	0.0665	
BC	11.05	1	11.05	4.24	0.0665	
A ²	36.00	1	36.00	13.81	0.0040	
B ²	14.33	1	14.33	5.50	0.0410	
C ²	35.19	1	35.19	13.50	0.0043	
Kalan	26.06	10	2.61			
R ²			0.9158			
R ² -Ayarlanmış			0.8401			
Yeterli hassasiyet			12.186			
CV%			2.01			

Bisfenol A için tahmin edilen giderim yüzdesine (%) karşı giderim yüzdesi (%) grafiği Şekil 3.1a'da gösterilmiştir. Tahmin edilen ve deneysel giderim yüzdesi (%) arasında iyi bir uyum vardır. Hem BG4 hem de BY28 için tahmin edilen çıkarma verimliliği (%) ile deneysel çıkarma verimliliği (%) grafikleri Şekil 5'te gösterilmiştir. Öngörülen ve deneysel çıkarma verimliliği (%) arasında iyi bir anlaşma vardı.

Graphs of estimated removal efficiency (%) and experimental removal efficiency (%) for both BG4 and BY28 are shown in Figure 5. There was good agreement between predicted and experimental extraction efficiency (%).

Hem BG4 hem de BY28 için deneysel çıkarma verimliliğine (%) karşı tahmin edilen çıkarma verimliliği (%) grafikleri Şekil 5'te gösterilmiştir. Öngörülen ve deneysel çıkarma verimliliği (%) arasında iyi bir uyum vardı.

Graphs of estimated removal efficiency (%) versus experimental removal efficiency (%) for both BG4 and BY28 are shown in Figure 5. There was good agreement between the predicted and experimental extraction efficiency (%).

Tam sonuçlar yüklenemiyor

Tekrar dene

Tekrar deneniyor...

Tekrar deneniyor...

Elde edilen 0.9158 R^2 değeri, giderim yüzdesi (%) için varyasyonların %91.58'inin model tarafından açıklanabileceğini ve modelin varyasyonların sadece %8.42'ini açıklayamadığını göstermiştir (Fathinia ve ark., 2010). Farklı bağımsız değişkenlerin olduğu bir sistemde, uygulanan modelin uygunluğunu değerlendirmek için ayarlanmış R^2 'nin de uygun olduğu belirtilmelidir. Çeşitli bağımsız değişkenlerin olduğu bir sistemde, uygulanan modelin iyiliğini değerlendirmek için ayarlanmış R^2 'nin daha uygun olduğu belirtilmelidir.

It should be noted that in a system with several independent variables, adjusted R^2 is more appropriate to evaluate the goodness of the applied model.

Çeşitli bağımsız değişkenlere sahip bir sistemde, uygulanan modelin iyiliğinin değerlendirilmesi için ayarlanmış R^2 'nin daha uygun olduğu belirtilmelidir.

It should be noted that in a system with several independent variables, adjusted R^2 is more appropriate for evaluating the goodness of the applied model.

Tam sonuçlar yüklenemiyor

Tekrar dene

Tekrar deneniyor...

Tekrar deneniyor...

Bulunan yüksek ayarlanmış R^2 değeri (0.8401), tahmin edilen ve deneysel veriler arasında iyi bir uyum olduğunu göstermektedir (Khataee ve ark., 2010). Modelin önemi, elde edilen F -değeri ve P -değeri ile de araştırılmıştır. *Modelin önemi, elde edilen F değeri ve P değeri ile daha da araştırıldı.*

The significance of the model was further explored by the resulting F -value and P -value.

Modelin önemi, elde edilen F değeri ve P değeri ile daha da incelendi.

The significance of the model was further examined by the resulting F -value and P -value.

Tam sonuçlar yüklenemiyor

Tekrar dene

Tekrar deneniyor...

Tekrar deneniyor...

12.09 olan F -değeri, modelin anlamlı olduğunu gösterir. 75.27'lik Model F değeri, modelin anlamlı olduğunu gösterir.

A Model F value of 75.27 indicates that the model is significant.

75.27'lik Model F değeri, modelin anlamlı olduğunu ima eder.

A Model F value of 75.27 implies that the model is significant.

Tam sonuçlar yüklenemiyor

Tekrar dene

Tekrar deneniyor...

Tekrar deneniyor...

Gürültü nedeniyle bu kadar büyük bir “model F -değeri” oluşma olasılığı yalnızca %0,03'dür. İlave olarak, artık değerlerin (hataların) değerlendirilmesi, modelin ANOVA'nın varsayımlarını ne kadar iyi karşıladığını göstermek için uygun bir araç olarak düşünülebilir. Ek olarak, artıkların değerlendirilmesi, modelin ANOVA'nın varsayımlarını ne kadar iyi karşıladığını göstermek için uygun bir araç olarak düşünülebilir.

Additionally, evaluation of residuals can be considered as a convenient tool to show how well the model meets the assumptions of ANOVA.

Ek olarak, artıkların değerlendirilmesi, modelin ANOVA'nın varsayımlarını ne kadar iyi karşıladığını göstermek için uygun bir araç olarak kabul edilebilir.

Also, evaluation of residuals can be considered as a suitable tool to show how well the model satisfies the assumptions of ANOVA.

Tam sonuçlar yüklenemiyor

Tekrar dene

Tekrar deneniyor...

Tekrar deneniyor...

Bu analiz, aykırı değerlerin tanımlanmasını ve normal olasılık ve artık değer grafikleri gibi tanılama grafiklerinin incelenmesini içerir. Bu analiz, aykırı değerlerin tanımlanmasını ve normal olasılık ve artık grafikler gibi tanılama grafiklerinin incelenmesini içerir.

This analysis includes identifying outliers and examining diagnostic plots such as normal probability and residual plots.

Bu analiz, aykırı değerlerin belirlenmesini ve normal olasılık ve artık grafikler gibi tanılama grafiklerinin incelenmesini içerir.

This analysis includes identifying outliers and examining diagnostic plots such as normal probability and residual plots.

Tekrar deneniyor...

Tekrar deneniyor...

Normal olasılık grafikleri, artık değerlerin normal bir dağılım izleyip izlemediğini gösterir (Alidokht ve ark., 2011). Artık değerlerin normal olasılık çizimleri Şekil 3.11b'de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, makul derecede artık değerler vardır ve artık değerler düz bir çizgiye benzer şekilde normal olarak dağılmıştır. BG4 ve BY28 için artıkların normal olasılık çizimleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Gösterildiği gibi, hem BG4 hem de BY28 durumunda makul derecede iyi davranışlı artıklar vardı ve artıklar düz bir çizgiye benzer şekilde normal olarak dağılmıştı.

Normal probability plots of residuals for BG4 and BY28 are shown in Figure 6. As shown, there were reasonably well-behaved residues in both the BG4 and BY28 cases, and the residues were normally distributed, similar to a straight line.

BG4 ve BY28 için artıkların normal olasılık çizimleri Şekil 6'da gösterilmektedir. Gösterildiği gibi, hem BG4 hem de BY28 durumunda makul derecede iyi davranışlı artıklar vardı ve artıklar düz bir çizgiye benzer şekilde normal olarak dağıldı.

Normal probability plots of residuals for BG4 and BY28 are shown in Figure 6. As shown, there were reasonably well-behaved residues in both the BG4 and BY28 cases, and the residues were normally distributed similar to a straight line.

Tam sonuçlar yüklenemiyor

Tekrar dene

Tekrar deneniyor...

Tekrar deneniyor...

Ayrıca, tahmin edilen yanıtlara karşı artık değerler grafiği, Şekil 3.11c'de verilmiştir. Eğrinin, grafik boyunca sabit bir artık değer aralığına sahip rastgele bir dağılım olması beklenir. Çizimin, grafik boyunca sabit bir artık aralığına sahip rastgele bir dağılım olması bekleniyordu.

The plot was expected to be a random distribution with a constant range of residuals throughout the graph.

Grafğin, grafik boyunca sabit bir artık aralğı ile rastgele bir dağılım olması bekleniyordu.

The graph was expected to be a random distribution with a constant range of residuals throughout the graph.

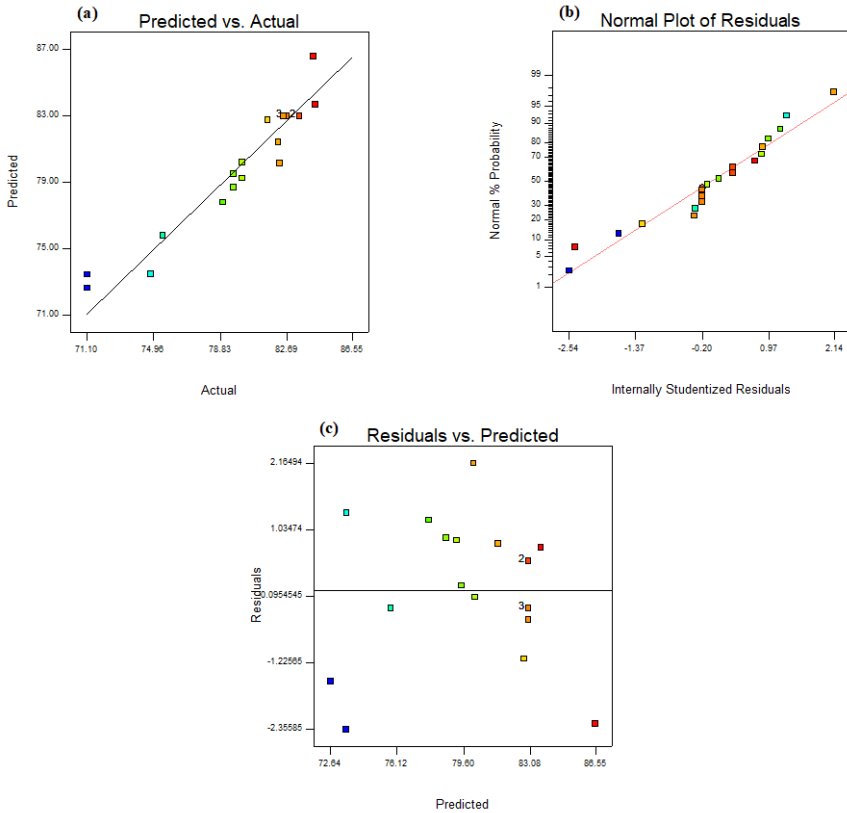
Tam sonuçlar yüklenemiyor

Tekrar dene

Tekrar deneniyor...

Tekrar deneniyor...

Şekil'de gösterildiğı gibi, grafikteki artık değerler, merkez çizgisi etrafında rastgele bir düzende dalgalanmıştır.



BG4 durumunda, elde edilen 0,960 değeri, çıkarma verimliliğı (%) için varyasyonların %96,0'ının model tarafından açıklanabileceğini ve modelin varyasyonların yalnızca %4,0'ını açıklayamadığını göstermiştir.

In the case of BG4, the obtained value of 0.960 indicated that 96.0% of the variations for the extraction efficiency (%) could be explained by the model and the model could not explain only 4.0% of the variations.

Tam sonuçlar yüklenemiyor

Tekrar dene

Tekrar deneniyor...

Tekrar deneniyor...

BY28 durumunda, elde edilen 0,927 değeri, varyasyonların %92,7'sinin model tarafından açıklandığını ve modelin varyasyonların yalnızca %7,3'ünü açıklayamadığını ortaya koydu.

In the case of BY28, the resulting value of 0.927 revealed that 92.7% of the variations were explained by the model and the model failed to explain only 7.3% of the variations.

BY28 durumunda, elde edilen 0.927 değeri, varyasyonların %92.7'sinin model tarafından açıklandığını ve modelin varyasyonların sadece %7.3'ünü açıklayamadığını ortaya koydu.

In the case of BY28, the resulting value of 0.927 revealed that 92.7% of the variations were explained by the model and the model failed to explain only 7.3% of the variations.

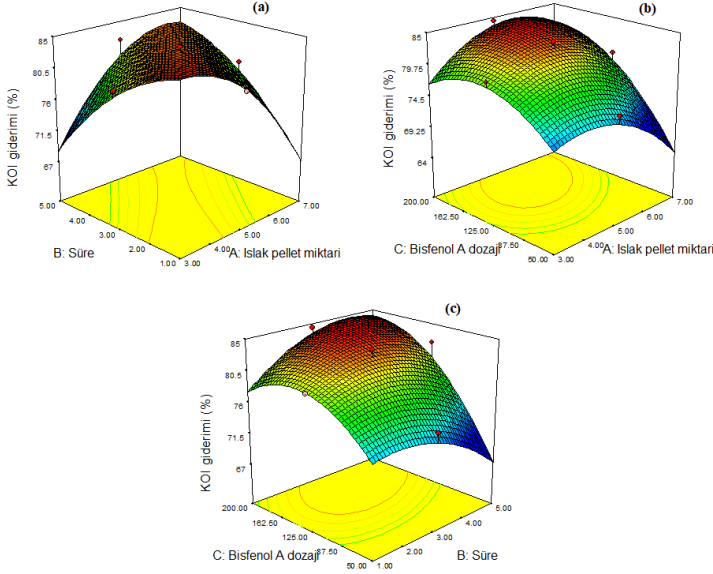
Tam sonuçlar yüklenemiyor

Tekrar dene

Tekrar deneniyor...

Tekrar deneniyor...

Şekil 3.1. (a) Tahmin edilen değerlerle deneysel sonuçların karşılaştırılması, (b) Normal olasılık grafiği (c) Artık ve tahmin edilen yanıt değerleri



0,050'den küçük "Prob>F" değerleri, model terimlerinin anlamlı olduğunu gösterir. Bu durumda C , AB , A^2 , B^2 ve C^2 anlamlı model terimleridir. Buna göre, başlangıç bisfenol A dozajının doğrusal etkisi, ıslak pellet miktarı ile sürenin etkileşim etkisi ve ıslak pellet miktarı, başlangıç bisfenol A dozajı ve sürenin ikinci dereceden etkisi istatistiksel olarak anlamlı parametrelerdir. Sinyal-gürültü oranını ölçen yeterli hassasiyet değerinin 4'ten büyük olması arzu edilir. Bu çalışmada yeterli hassasiyet değeri, 12.186'dır ve bu modelin tasarım alanında gezinmek için kullanılabileceğini gösterir. Varyasyon katsayısı (%CV) değerinin düşük olması (2.01) modelin sadece güvenilirliğini değil aynı zamanda tekrarlanabilirliğini de göstermektedir (Arabpour ve ark, 2021).

Bağımsız değişkenlerin KOİ giderimi (%) üzerindeki etkileşim etkileri Şekil 3.2a-c'de üç boyutlu (3D) yanıt yüzey grafikleri halinde gösterilmiştir. Şekil 3.2a, başlangıç bisfenol A dozajı 125 ppm'de sabit tutularak süre ve ıslak pellet miktarının etkileşim etkilerini göstermektedir. Şekilden temas süresi arttıkça daha az pellet miktarına ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Şekil 3.2b, temas süresi 3 gün'de sabit tutulurken ıslak pellet miktarı ve başlangıç bisfenol A dozajının etkileşim etkilerini göstermektedir. Yaklaşık 160 ppm bisfenol A dozajına kadar KOİ giderim veriminin arttığı, daha sonra önemli ölçüde değişmediği görülmektedir. Şekil 3.2c, sabit ıslak pellet miktarında (5 g) KOİ giderimi üzerindeki temas süresi ve başlangıç bisfenol A dozajının etkisini gösteren bir üç boyutlu yüzey grafiğidir. Temas süresi ve başlangıç bisfenol A dozajının eşzamanlı etkisi olduğu şekilden görülmektedir.

Düşük bir CV (Varyasyon Katsayısı) değeri, yürütülen deneysel değerlerin güvenilirliğini ima etti.

A low CV (Coefficient of Variation) value implied the reliability of the experimental values conducted.

Düşük bir CV değeri (Varyasyon Katsayısı), yürütülen deneysel değerlerin güvenilirliğini ima etti.

A low CV value (Coefficient of Variation) implied the reliability of the experimental values conducted.

Tam sonuçlar yüklenemiyor

Tekrar dene

Tekrar deneniyor...

Tekrar deneniyor...

bu çok düşük değerler modelin sadece güvenilirliğini değil aynı zamanda tekrarlanabilirliğini de göstermektedir.

these very low values indicate not only the reliability of the model but also its repeatability.

bu çok düşük değerler, modelin sadece güvenilirliğini değil, aynı zamanda tekrarlanabilirliğini de gösterir.

these very low values indicate not only the reliability of the model, but also its repeatability.

Tam sonuçlar yüklenemiyor

Tekrar dene

Tekrar deneniyor...

Tekrar deneniyor...

Burada yeterli kesinlik değerleri, çıkarma verimliliği için 25.149 ve biyosorpsiyon kapasitesi için 14.108'dir ve bu, modellerin tasarım alanında gezinmek için kullanılabileceğini gösterir.

Sufficient precision values here are 25,149 for extraction efficiency and 14,108 for biosorption capacity, indicating that the models can be used to navigate the design space.

Burada yeterli hassasiyet değerleri, çıkarma verimliliği için 25.149 ve biyosorpsiyon kapasitesi için 14.108'dir ve bu, modellerin tasarım alanında gezinmek için kullanılabileceğini gösterir.

Sufficient sensitivity values here are 25,149 for extraction efficiency and 14,108 for biosorption capacity, indicating that models can be used to navigate the design space.

Tam sonuçlar yüklenemiyor

Tekrar dene

Tekrar deneniyor...

Tekrar deneniyor...

Şekil 3.2. Yanıt yüzey grafikleri

DeneySEL sonuçlar Design-Expert yazılımı ile optimize edilmiştir. Optimizasyon sonuçları Tablo 3.3’de gösterilmiştir. Optimize edilmiş koşullar şu şekilde seçilmiştir: g ıslak pellet miktarı= 6.44, süre= 4.80 gün ve başlangıç bisfenol A dozajı= 142.37 ppm olarak elde edilmiştir. Bu değerler altında KOİ giderim verimi %85.1136’dır. Seçilen değerlerin doğruluğunu belirlemek için yapılan kontrol deneyleri sonucunda, modelin giderim verimini tahmin etmedeki doğruluğunu gösteren %85.84’lük bir KOİ giderim verimi elde edilmiştir.

Tablo 3.3. Maksimum KOİ giderimi için proses faktörlerinin sayısal değeri
(Desirability=1.000)

	Islak pellet miktarı (g)	Süre (gün)	Başlangıç bisfenol A dozajı (ppm)	KOİ giderim verimi (%)
Optimum değer	6.44	4.80	142.37	85,1136

Çevresel kirleticilerin gideriminde yaygın olarak çeşitli fizikokimyasal yöntemler kullanılmaktadır. Ancak bu tekniklerin uygulanabilirliği; yüksek işletme ve bakım maliyetleri ile birlikte tehlikeli ikincil yan ürünlerin oluşumu gibi nedenlerle sıklıkla sınırlanmaktadır. Bu bağlamda, kirletici giderimi için umut vadeden bir yaklaşım olan biyoremediasyon, alternatif yöntemlere kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır. Biyoremediasyon; yüksek giderim verimliliği, çevre dostu bir süreç olması ve düşük işletme ve bakım maliyetleriyle öne çıkmaktadır. Bu yöntem, mantar ve bakteri gibi mikroorganizmaların kirleticileri parçalama, dönüştürme veya ortamdan uzaklaştırma kapasitelerinden yararlanmaya dayanmaktadır (Giovanella ve ark., 2020).

Mikroorganizmalar arasında bakteriler, biyolojik süreçlere olan yüksek uyumları nedeniyle özellikle dikkat çekmektedir. Hızlı büyüme ve çoğalma yetenekleri, bakterilerin organik kirleticilerin etkin bir şekilde giderilmesinde önemli bir potansiyele sahip olmasını sağlamaktadır. Bu özellikleri sayesinde bakteriler, çevresel ortamların arıtımında etkili biyolojik ajanlar olarak değerlendirilmektedir (Bhatia ve ark., 2017).

Öte yandan, *Aspergillus niger*, *Aspergillus fumigatus* ve *Aspergillus niveus* gibi çeşitli fungal sporlar da biyoremediasyon uygulamaları açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır. Ancak bazı fungal türlerde spor oluşum döngüsünün uzun olması, uygulama sürecini sınırlayabilmektedir. Buna karşın, Ascomycetes grubuna ait mantarların özellikle endüstriyel atıksularda, başta distilasyon tesisleri olmak üzere, kimyasal oksijen ihtiyacının (KOİ) gideriminde yüksek etkinlik gösterdiği bildirilmektedir (Mohammad ve ark., 2006).

Bardi ve ark. (2017) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, beyaz çürük mantarı olan *Bjerkandera adusta* MUT 2295 suşunun tanen ve hümkik asit içeren sentetik kalıcı atıklar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elde edilen bulgular, biyoremediasyon açısından oldukça umut verici sonuçlar ortaya koymuştur. Buna göre, tanen içeren atıkta %61 oranında KOİ giderimi sağlanırken; tanen ve hümkik asit çözeltilerinde sırasıyla %89 ve %75 oranlarında biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİs) giderimi elde edilmiştir.

Birleşik kültür uygulamalarıyla sağlanan yüksek KOİ gideriminin, artan biyokütle üretimi ile ilişkili olduğu bildirilmektedir. Evsel atıksularda bulunan organik maddelerin asimilasyonu, mikroalg kültürlerinin büyümesini teşvik ederek giderim performansını artırmaktadır. Bununla birlikte, kalıcı organik bileşiklerin varlığı mikroalgler tarafından parçalanmayı zorlaştırmakta ve bu durum KOİ gideriminin tam olarak gerçekleşmesini engelleyebilmektedir (Xia ve Murphy, 2016).

Yıldırım ve ark. (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, sentetik olarak hazırlanmış evsel atıksuyun arıtımında beyaz çürük mantarı *Phanerochaete chrysosporium* kullanılarak KOİ, toplam organik karbon (TOK), toplam azot (TA) ve toplam fosfor (TF) parametrelerine göre giderim verimleri değerlendirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, elde edilen biyoremediasyon sonuçlarının Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği ile uyumluluğunu ortaya koymaktır. Deneyler 11 gün boyunca statik ve dinamik koşullarda, 1/1 ve 1/5 seyreltme oranları kullanılarak yürütülmüştür. Sonuçlar, en yüksek giderim verimlerinin dinamik koşullarda ve 1/5 seyreltme oranında elde edildiğini göstermiştir. Bu koşullarda KOİ için %84, TOK için %81, TA için %73 ve TF için %56 oranlarında giderim sağlanmıştır. Buna karşılık, en düşük giderim verimleri statik 1/1 koşullarında belirlenmiş; KOİ %48, TOK %33, TA %31 ve TF %45 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular, *P. chrysosporium*'un 11 günlük nispeten kısa bir sürede sentetik evsel atıksu üzerinde etkili bir biyoremediasyon kapasitesine sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Yıldırım ve ark., 2023). Benzer şekilde Faraco ve ark. (2009), beyaz çürük mantarı *Pleurotus ostreatus* kullanarak asidik boya içeren atıksularda bir haftalık uygulama sonucunda %31 oranında KOİ giderimi elde ettiklerini rapor etmiştir.

Bu çalışmanın sonuçlarına göre, canlı *P. chrysosporium* peletlerinin tekstil atıksuyundaki renk gideriminde 48 saat sonunda %86'nın üzerinde bir verim sağladığı belirlenmiştir. Bu süre, literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında oldukça uygun bir zaman aralığı sunmaktadır. Elde edilen bulgular, bu mikrobiyal kaynağın tekstil atıksularının arıtımında alternatif bir yöntem olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Boya giderim kapasitesinin temas süresine bağlı olduğu ve karıştırılmalı veya statik ortam koşullarıyla doğru orantılı olarak arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, 6,44 mg yaş pelet miktarında *P. chrysosporium*'un KOİ giderim performansının yüksek olduğu ve 4,8 gün içerisinde %85,8'e varan KOİ giderim verimi sağladığı tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, *P. chrysosporium* peletlerinin Bisfenol A gibi kalıcı organik kirleticilerin biyoremediasyonunda önemli bir rol üstlenebileceğini ortaya koymaktadır.

Teşekkür: Bu çalışma, Munzur Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir. **Proje No:** MFMUB025-03

4.KAYNAKLAR

- A. Arabpour, S. Dan, H. Hashemipour, Preparation and optimization of novel graphene oxide and adsorption isotherm study of methylene blue, *Arabian Journal of Chemistry* (2021) 14, 103003, 1-13.
- A.R. Khataee, M. Zarei, L. Moradkhannejhad, Application of response surface methodology for optimization of azo dye removal by oxalate catalyzed photoelectro-Fenton process using carbon nanotube-PTFE cathode, *Desalination* 258 (2010) 112–119.
- Baldrian, P. (2006). Fungal laccases – occurrence and properties. *FEMS Microbiology Reviews*, 30(2), 215–242.
- Bardi, A., Yuan, Q., Tigini, V., Spina, F., Varese, G.C., Spennati, F., Simone Becarelli, S., Gregorio, S.D., Petroni, G., Munz, G. (2017). Recalcitrant compounds removal in raw leachate and synthetic effluents using the white-rot Fungus *Bjerkandera adusta*. *Water*, 9(824), 1-14
- Bhatia, D., Sharma, N.R., Singh, J., Kanwar, R.S. (2017). Biological methods for textile dye removal from wastewater. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. A review, 47(19), 1836-1876
- Chen, D., Chen, J., Liu, M., Jin, X., & Zhao, Y. (2016). Effects of bisphenol A on soil microbial community and enzyme activity. *Environmental Pollution*, 213, 500–507.
- Cıkcıkoğlu-Yıldırım et al. / Uluslararası Tarım Araştırmalarında Yenilikçi Yaklaşımlar Dergisi *International Journal of Innovative Approaches in Agricultural Research*, 2023, Vol. 7 (4), 388-402
- Faraco, V., Pezzella, C., Miele, A., Giardina, P. & Sannia, G. (2009). Bioremediation of colored industrial wastewaters by the white-rot fungi *Phanerochaete chrysosporium* and *Pleurotus ostreatus* and their enzymes. *Biodegradation*, 20, 209-220.
- Flint, S., Markle, T., Thompson, S., & Wallace, E. (2012). Bisphenol A exposure, effects, and policy: A wildlife perspective. *Journal of Environmental Management*, 104, 19–34.
- Giovanella, P., Vieira, G.A.L., Ramos Otero, I.V., Pais Pellizzer, E., de Jesus Fontes, B., Sette, L.D. (2020). Metal and organic pollutants bioremediation by extremophile microorganisms. *Journal of Hazardous Materials*, 15(382), Article, 121024.
- Gore, A. C., Chappell, V. A., Fenton, S. E., Flaws, J. A., Nadal, A., Prins, G. S., Toppari, J., & Zoeller, R. T. (2015). EDC-2: The Endocrine Society’s second scientific statement on endocrine-disrupting chemicals. *Endocrine Reviews*, 36(6), E1–E150.

- Harms, H., Schlosser, D., & Wick, L. Y. (2011). Untapped potential: Exploiting fungi in bioremediation of hazardous chemicals. *Nature Reviews Microbiology*, 9(3), 177–192.
- Kang, J. H., Kondo, F., & Katayama, Y. (2007). Human exposure to bisphenol A. *Toxicology*, 226(2–3), 79–89.
- Kirk, T. K., & Farrell, R. L. (1987). Enzymatic “combustion”: The microbial degradation of lignin. *Annual Review of Microbiology*, 41, 465–505.
- L. Alidokht, A.R. Khataee, A. Reyhanitabar, S. Oustan, Cr(VI) immobilization process in a Cr-spiked soil by zerovalent iron nanoparticles: optimization using response surface methodology, *CLEAN-Soil Air Water* 39 (2011) 633–640.
- Landrigan, P. J., Fuller, R., Acosta, N. J. R., Adeyi, O., Arnold, R., Baldé, A. B., et al. (2018). The Lancet Commission on pollution and health. *The Lancet*, 391(10119), 462–512.
- Liao, C., & Kannan, K. (2011). Widespread occurrence of bisphenol A in paper and paper products. *Environmental Science & Technology*, 45(21), 9372–9379.
- M. Fathinia, A.R. Khataee, M. Zarei, S. Aber, Comparative photocatalytic degradation of two dyes on immobilized TiO₂ nanoparticles: effect of dye molecular structure and response surface approach, *J. Mol. Catal. A: Chem.* 333 (2010) 73–84.
- Manahan, S. E. (2011). *Environmental Chemistry* (9th ed.). CRC Press, Boca Raton.
- Mohammad, P., Azarmidokht, H., Fatollah, M., Mahboubeh, B. (2006). Application of response surface methodology for optimization of important parameters in decolorizing treated distillery wastewater using *Aspergillus fumigatus* UB2.60. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 57, 195–199.
- Mustieles, V., & Fernández, M. F. (2020). Bisphenol A shapes children's brain and behavior: Towards an integrated neurotoxicity assessment including human data. *Environmental Health*, 19, 66.
- Poyatos, J. M., Muño, M. M., Almecija, M. C., Torres, J. C., Hontoria, E., & Osorio, F. (2010). Advanced oxidation processes for wastewater treatment: State of the art. *Water, Air, & Soil Pollution*, 205, 187–204.
- Rubin, B. S. (2011). Bisphenol A: An endocrine disruptor with widespread exposure and multiple effects. *Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology*, 127(1–2), 27–34.
- Schwarzenbach, R. P., Escher, B. I., Fenner, K., Hofstetter, T. B., Johnson, C. A., von Gunten, U., & Wehrli, B. (2006). The challenge of micropollutants in aquatic systems. *Science*, 313(5790), 1072–1077.

- Shannon, M. A., Bohn, P. W., Elimelech, M., Georgiadis, J. G., Mariñas, B. J., & Mayes, A. M. (2008). Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*, 452, 301–310.
- Strong, P. J., & Claus, H. (2011). Laccase: A review of its past and future in bioremediation. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 41(4), 373–434.
- Tien, M., & Kirk, T. K. (1983). Lignin-degrading enzyme from *Phanerochaete chrysosporium*. *Science*, 221(4611), 661–663.
- Xia, A., Murphy, J.D. (2016). Microalgal Cultivation in Treating Liquid Digestate from Biogas Systems. *Trends in Biotechnology*, 34, 264-27.
- Yamamoto, T., Yasuhara, A., Shiraishi, H., & Nakasugi, O. (2001). Bisphenol A in hazardous waste landfill leachates. *Chemosphere*, 42(4), 415–418.



BÖLÜM 9

Elektrik Özdirenç Tomografi Yönteminde pyGIMLi Kütüphanesi ve Bert Yazılımının Kullanımı

Ziya Öncü¹

1. GİRİŞ

Yerbilimlerinde yer altı yapılarının tahribatsız, yüksek çözünürlüklü ve mekansal olarak sürekli bir biçimde görüntülenmesi, modern jeofizik araştırmalarının en dinamik alanlarından birini oluşturmaktadır. Bu kapsamda geliştirilen Elektrik Özdirenç Tomografisi (Electrical Resistivity Tomography)(ERT)), yer altı elektriksel özdirenç dağılımının yüksek çözünürlüklü görüntülerini elde etmek amacıyla kullanılan, tahribatsız bir jeofizik yöntemdir. Yöntemin temel başarısı, yer tabakalarının sahip olduğu elektriksel özelliklerin litolojik ve hidrojeolojik değişkenlere olan duyarlılığına dayanır. Geleneksel doğru akım özdirenç yöntemlerinin çok elektrotlu sistemler ve gelişmiş sayısal ters çözüm algoritmaları ile birleştirilmesiyle ortaya çıkan bu teknik, günümüzde çevre jeofiziği, hidrojeoloji ve mühendislik jeolojisi alanlarında etkili bir görüntüleme aracı haline gelmiştir (Griffiths & Barker, 1993; Loke vd., 2003).

Çevresel problemlerin büyük bir kısmının yer altında gelişmesi ve doğrudan gözlemlenmesinin imkansız olması, ERT gibi yüksek çözünürlüklü görüntüleme tekniklerini kritik bir ihtiyaç haline getirmektedir. Özellikle son yıllarda, veri toplama sistemlerindeki otomasyon ve ters çözüm (inversiyon) algoritmalarındaki hesaplamalı ilerlemeler, yeraltı suyu kirliliği, katı atık depolama sahalarından kaynaklanan sızıntı sularının izlenmesi, kıyı akiferlerine deniz suyu girişiminin saptanması ve endüstriyel kirlenme süreçlerinin haritalanmasında, ERT yöntemini etkili bir uygulama haline getirmiştir (Reynolds, 2011). ERT sonuçlarının doğru bir şekilde yorumlanabilmesinde jeolojik bilgi kritik bir temel oluşturur; çünkü yöntemin değeri öncelikle yer altı jeolojik koşullarını karakterize etme yeteneğinde yatmaktadır. Sedimanter, magmatik ve metamorfik kaya oluşumu da dahil olmak üzere jeolojik süreçlerin bilinmesi, farklı jeolojik ortamlarda gözlemlenen elektrik özdirenç değişimlerini açıklamaya yardımcı olur. Faylanma, kıvrılma ve kırılma gibi yapısal jeoloji

¹ Dr., Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi , Aksu MSD Meslek Yüksekokulu
OrçId: 0000-0002-7806-3728

kavramları, deformasyona uğramış birimler ile ilgili öz direnç anomalilerinin yorumlanması için gereklidir. Yeraltı suyu akış prensipleri, akifer tipleri ve su kimyasının elektriksel iletkenlik üzerindeki etkileri de dahil olmak üzere hidrojeoloji temelleri, özellikle çevre ve su kaynakları uygulamaları için önemlidir. Bu nedenle ERT'nin tek başına “nihai” yorum aracı olarak değil, diğer saha verileri (yapısal jeoloji, sondaj, hidrojeokimya, GPR, sismik vb.) ile birlikte ele alınması gerekir (Adebowale vd., 2025).

ERT ile elde edilen verilerin modellenmesi ve yorumlanmasında kullanılan yazılımlar bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi de BERT(Boundless Electrical Resistivity Tomography) yazılımıdır. BERT yazılımı, sonlu elemanlar yöntemi (Finite Element Method – FEM) kullanarak ERT verilerinin ters çözümünü gerçekleştiren açık kaynaklı bir yazılım paketidir. Yazılım, pyGIMLi (Geophysical Inversion and Modelling Library) altyapısı üzerine geliştirilmiştir. Bu yapı sayesinde farklı geometrilerde ve karmaşık yeraltı modellerinde yüksek doğrulukla modelleme yapılabilmektedir (Günther & Rücker, 2006; Rücker, 2011).

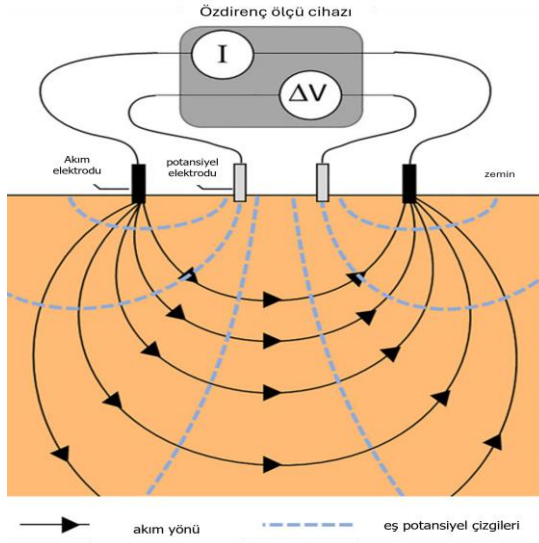
2. TEMEL TANIMLAR

2.1 Elektrik Öz direnç

Elektrik öz direnç (ρ), bir malzemenin elektrik akımına karşı gösterdiği iç direncin bir ölçüsüdür ve SI birim sisteminde ohm-metre (Ωm) olarak ifade edilir. Saha ölçümünde gerilim farkı (ΔV) ve zeminden geçirilen akım (I) ölçülür (Şekil 1). Homojen ortam varsayımında bu ölçümler, görünür öz direnç (ρ_a) olarak ifade edilir:

$$\rho_a = \kappa \cdot (\Delta V / I)$$

Burada κ , elektrotların göreceli konumlarına bağlı geometrik faktördür. Heterojen ortamda ρ_a , gerçek öz direnç dağılımının, ölçüm geometrisi ile ağırlıklandırılmış bir göstergesidir (Telford vd.,1990).

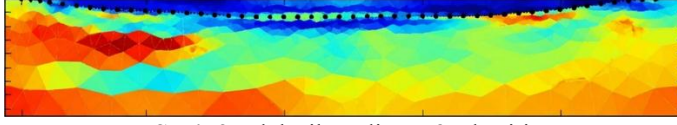


Şekil 1. Elektrik özdirenç yönteminde homojen yeraltında oluşturulan eşpotansiyel dağılımı (Talwani & Kessinger, 2003).

Yeryüzüne yakın katmanlarda özdirenç değerleri çok geniş aralıkta değişebilir. Örneğin kil genellikle düşük özdirenç (yaklaşık 1–20 Ωm), ıslak–nemli kum 20–200 Ωm mertebesinde; yoğun kireçtaşı ile magmatik/metamorfik kayalar ise çok daha yüksek özdirençler gösterebilir. Yer altı ortamında elektrik iletimi, büyük oranda, kayaç gözeneklerini dolduran akışkanın iyonik içeriği ve mineral yüzeylerindeki elektriksel çift katmanlar aracılığıyla gerçekleşir (Binley ve Kemna, 2005). Bu durum, özdirenç değerlerinin yer altındaki su içeriği, tuzluluk ve kil içeriği gibi çevresel değişkenlere karşı son derece hassas olmasını sağlar. Yer altı materyallerinde elektrik akımının iletimi üç temel mekanizma üzerinden analiz edilebilir: elektrolitik iletim, yüzey iletimi ve katı matris iletimidir. Çoğu kayaç oluşturan mineral (kuvars, feldispat vb.) elektriksel olarak yalıtkan kabul edildiğinden, katı matris iletimi genellikle ihmal edilebilir düzeydedir. Bu durumda temel iletim, gözenek suyunda çözünmüş halde bulunan iyonların hareketiyle sağlanan elektrolitik iletimdir. Ancak, ortamda kil mineralleri bulunduğunda, mineral yüzeylerindeki negatif yüklerin dengelenmesi için oluşan elektriksel çift katmandaki iyonların hareketiyle "yüzey iletimi" adı verilen ek bir iletkenlik bileşeni ortaya çıkar (Binley vd., 2015).

2.2 Elektrik Özdirenç Tomografisi

Elektrik özdirenç tomografisi (ERT), elektrik özdirenç yönteminin çok elektrotlu bir uygulamasıdır. Çok sayıda ölçümün uygun bir ters çözüm (inversiyon) yaklaşımı ile değerlendirilmesi sonucunda, hat profilleri boyunca 2B özdirenç modelleri üretilebilir (Şekil 2).



Şekil 2. Elektrik özdirenç 2B kesiti.

Yakın yüzey uygulamalarında ERT; çevresel kirlilik izlenmesi, çöp depolama sahası sızıntılarının belirlenmesi, kıyı akiferlerinde tuzluluk ve deniz suyu girişiminin haritalanması, mühendislik zeminlerinin ve boşlukların tespiti gibi konularda yaygın biçimde kullanılmaktadır (Cardarelli vd., 2010; Koda vd., 2017; Martinho, 2023)

Yer altındaki sıcaklık değişimleri, iyon mobilitesini etkileyerek özdirenç üzerinde doğrudan bir kontrole sahiptir. Sıcaklıktaki her 1 derecelik artış, özdirenç değerinde yaklaşık %2'lik bir azalmaya neden olur. Bu ilişki, özellikle jeotermal kaynakların araştırılmasında ve zaman bağımlı (4B) mevsimsel sıcaklık etkilerinin incelenmesinde kullanılır. Ayrıca, malzemenin tane boyutu ve dağılımı da özdirenç etkiler; ince taneli materyaller (killer) genellikle iri taneli materyallere (kum ve çakıl) göre daha düşük özdirenç değerleri sergiler (Tablo 1).

Tablo 1. Örnek birimlere ait elektrik özdirenç değerleri

Birim	Özdirenç aralığı (Ωm)	İletkenlik
Deniz Suyu	0.2	Çok Yüksek İletken
Sızıntı Suyu	< 10	Yüksek İletken
Kil	1 - 100	İletken
Alüvyon/Silt	10 - 200	Orta İletken
Tatlı Su	10 - 100	Orta İletken
Kum ve Çakıl	100 - 1,000	Dirençli

2.3 Ölçüm Prensipleri ve Elektrot Dizilim Sistemleri

ERT yöntemi, yer yüzeyine belirli aralıklarla yerleştirilen çok sayıda elektrodun, bir kontrol ünitesi aracılığıyla farklı kombinasyonlarda sıralanması esasına dayanır (Reynolds, 2011). Temel ölçüm düzeneği dört elektrottan oluşur: iki elektrot (A ve B) yere akım vermek için kullanılırken, diğer iki elektrot (M ve N) oluşan potansiyel farkını ölçmek için kullanılır (Loke, 1999).

Ölçüm sırasında seçilen elektrot geometrisi, yani "dizilim" (array), araştırmanın hem düşey (derinlik) hem de yatay çözünürlüğünü belirleyen önemli bir faktördür (Binley & Kemna, 2005). Elektrot dizilimi çalışılan probleme uygun biçimde seçilir.

2.3.1 Wenner Dizilimi : Wenner dizilimi, dört elektrotun (A-M-N-B) bir hat üzerinde eşit aralıklarla yerleştirildiği bir konfigürasyondur. Bu dizilimin en büyük avantajı, sinyal-gürültü oranının çok yüksek olmasıdır. Dikey yöndeki öz direnç değişimlerine karşı oldukça duyarlıdır (Reynolds, 2011). Ancak, yatay yöndeki değişimlere karşı hassasiyeti düşüktür ve derinlik kapasitesi, toplam hat uzunluğuna oranla sınırlıdır.

2.3.2 Schlumberger Dizilimi: Schlumberger diziliminde, potansiyel elektrotları (M-N) arasındaki mesafe, akım elektrotları (A-B) arasındaki mesafeye göre çok daha küçüktür. Bu dizilim, dikey çözünürlük açısından Wenner dizilimine benzerlik gösterse de, derin yapılar karşı daha hassastır. Saha çalışmaları sırasında sadece dış elektrotların hareket ettirilmesi, bu dizilimi iş gücü açısından daha verimli olmasını sağlar.

2.3.3 Dipol-Dipol Dizilimi: Dipol-dipol diziliminde, bir çift akım elektrotu (A-B) ve bir çift potansiyel elektrotu (M-N) birbirinden uzaklaştırılarak ölçüm alınır (Binley ve Kemna, 2005). Bu dizilim, yatay değişimlere karşı en yüksek duyarlılığı sergileyen konfigürasyondur. Kirlilik sınırlarını belirlemek veya dik tabakalı yapıları görüntülemek için tercih edilmektedir.

2.3.4 Pole-Dipol ve Pole-Pole Dizilimleri : Pole-dipol diziliminde akım elektrotlarından biri (B), pole-pole diziliminde ise hem bir akım (B) hem de bir potansiyel (N) elektrotu "sonsuz" (ölçüm hattından çok uzağa) yerleştirilir (Everett, 2013). Bu dizilimler asimetrik yapılarına rağmen çok derin penetrasyon kapasitesi sunarlar (Loke, 1999; Dahlin & Zhou, 2004). Özellikle derin maden aramalarında veya derin akifer araştırmalarında tercih edilen elektrot dizilimidir.

Tablo 2. Elektrot dizilimlerinin çözünürlüğü

Dizilim Tipi	Yatay Çözünürlük	Dikey Çözünürlük	Derinlik	Sinyal Gücü
Wenner	Düşük	Yüksek	Orta	Güçlü
Schlumberger	Orta	Yüksek	Yüksek	Güçlü
Dipol-Dipol	Yüksek	Düşük	Orta	Zayıf
Pole-Dipol	Yüksek	Orta	Yüksek	Orta
Pole-Pole	Düşük	Düşük	Yüksek	Orta

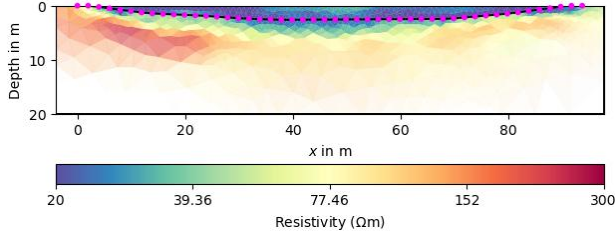
3. VERİ İŞLEME VE DEĞERLENDİRME

Sahadan toplanan görünür özdirenç verileri, yer altının gerçek yapısını doğrudan yansıtmaz. Bu verilerin anlamlı bir modele dönüştürülmesi için "ters çözüm" (inversion) olarak adlandırılan karmaşık bir sayısal süreç gereklidir (Loke & Barker, 1996; Dahlin, 2001). Bu amaçla geliştirilen BERT yazılımı, sonlu elemanlar yöntemi (Finite Element Method – FEM) kullanarak ERT verilerinin ters çözümünü gerçekleştiren açık kaynaklı bir yazılım paketidir. Yazılım, pyGIMLi (Geophysical Inversion and Modelling Library) altyapısı üzerine geliştirilmiştir (Rücker, vd., 2017).

pyGIMLi, jeofizik alanında çok yöntemli modelleme ve ters çözüm işlemleri için geliştirilmiş, açık kaynak kodlu bir yazılım kütüphanesidir. Bu platform; elektrik özdirenç tomografisi, sismik kırılma ve manyetik rezonans gibi farklı tekniklerin ortak veri analizi ve simülasyonu için kapsamlı bir altyapıya sahiptir. Windows, Linux ve Mac işletim sistemleriyle uyumlu bir kütüphanedir. pyGIMLi kütüphanesini kullanan BERT yazılımında ters çözüm işleminin temel aşamaları aşağıdaki şekilde verilir;

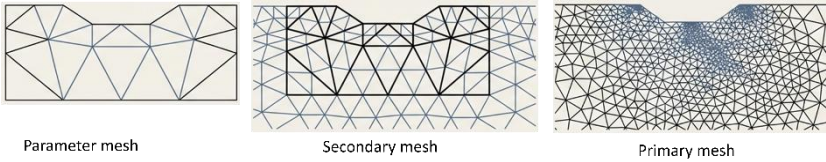
- Geometri ve ağ (mesh) oluşturulması,
- Birincil potansiyellerin hesaplanması,
- Duyarlılık matrisinin oluşturulması,
- Gauss–Newton tabanlı optimizasyon ile özdirenç modelinin güncellenmesi,
- Model ile ölçülen veriler arasındaki uyumun değerlendirilmesi.

Bu süreçte veri uyumu RMS, relatif RMS ve χ^2 metrikleri ile değerlendirilmektedir (Günther & Rücker, 2006). BERT yazılımı ilk olarak basit iki boyutlu (2D) yüzey ölçümleri için kullanılmaktadır. Bu analizlerde elektrotlar yüzey boyunca belirli aralıklarla yerleştirilir ve dipol-dipol gibi ölçüm dizileri kullanılarak veriler toplanır. Elde edilen görünür öz direnç verileri ters çözüm işleminden geçirilerek yeraltının gerçek öz direnç dağılımı elde edilir (Şekil 3).



Şekil 3. BERT ile elde edilen elektrik öz direnç tomografi 2B kesiti.

BERT yazılımı, yapılandırılmamış (unstructured) sonlu elemanlar ağlarını kullanarak her türlü geometri üzerinde 2B ve 3B ERT ters çözümü yapılmasına olanak tanıyan esnek bir çözümdür. Yazılımın temel çalışma prensibi; parametre ağı, düz çözüm için kullanılacak ikincil ağ ve başlangıç potansiyellerin hesaplandığı birincil ağdan oluşan üçlü ağ (triple-grid) şemasına dayanır (Şekil 4).



Şekil 4. BERT üçlü ağ yapısı.

3.1. BERT Yazılımının Kullanımı

Yazılım Windows ve Linux işletim sistemleri üzerinde çalışmaktadır. Ancak Linux işletim sistemi üzerinde daha kolay kullanılabilmektedir. Windows işletim sisteminde kullanmak için Anaconda ile BERT yazılımına ait gerekli kütüphanelerin kurulumu sağlanabilmektedir. Yazılım sadece komut satırından verilen komutlar ile kullanılmaktadır. Kullanıcı arayüzü bulunmamaktadır.

BERT ile modelleme süreci genel olarak şu adımlarla gerçekleştirilmektedir;

- *Yeni proje dosyası oluşturma ve yükleme*

Modelleme süreci, tüm ayarların saklandığı bir konfigürasyon (.cfg) dosyasının oluşturulmasıyla başlar. (Örnek konfigürasyon dosyaları /home/examples dizininde bulunmaktadır)

2B için: ``$ bertNew2D veri_dosyasi.dat > bert.cfg`` komutu kullanılır.

3B için: ``$ bertNew3D veri_dosyasi.dat > bert.cfg`` komutu kullanılır. (Topografya verisi varsa, ``bertNew2DTopo`` veya ``bertNew3DTopo`` komutları kullanılmalıdır). Konfigürasyon dosyasında ``DATAFILE`` ``DIMENSION`` (2 veya 3) ve ``TOPOGRAPHY`` (0 veya 1) gibi anahtar kelimeler mutlaka tanımlanmalıdır.

- *Ağ (Mesh) oluşturma ve ayarlar*

BERT, karmaşık geometrileri takip edebilmek için 2B'de üçgenler, 3B'de ise tetrahedronlar kullanır. Hücre Kalitesi: ``PARA2DQUALITY`` (2B için ideal değer 34-35) veya ``PARA3DQUALITY`` (3B için 1.2-1.5) ile ağın kalitesi kontrol edilir. Elektrot çevresindeki ağ yoğunluğu ``PARADX`` parametresi ile ayarlanır. Derinlik: Parametre alanının derinliği ``PARADEPTH`` ile otomatik veya manuel olarak belirlenebilir.

- *Ters çözüm süreci*

Ağ oluşturulduktan sonra inversiyon işlemi için kullanılan komut dizisi;

``$ bert bert.cfg all``

Bu komut ile veriler filtrelenir, ağlar oluşturulur (``meshs``), birincil potansiyeller hesaplanır (``pot``) ve inversiyonu (``calc``) gerçekleştirir.

Düzenleştirme (Regularization): Modelin düzgünlüğü ``LAMBDA`` parametresi ile kontrol edilir. Yüksek değerler daha pürüzsüz modeller oluştururken, düşük değerler veriye daha sıkı uyum sağlar. Anizotropi: Yer altındaki tabakalaşmayı vurgulamak için dikey gradyan ağırlığı ``ZWEIGHT`` (varsayılan 1) düşürülebilir.

- *2B ve 3B Modelleme*

2B Modelleme: Yüzey ölçümleri, kuyu içi (cross-hole) veriler ve ağaç tomografisi gibi kapalı geometriler için uygundur. Görselleştirme için ``bert bert.cfg show`` komutu kullanılır.

3B Modelleme: Yüzey elektrot dizilimleri veya karmaşık topografyaya sahip alanlar için kullanılır. 3B sonuçlar .vtk formatında kaydedilir.

- *Sonuçların Değerlendirilmesi*

İnversiyonun başarısı, rms (kök ortalama kare hatası), rrms (bağıl rms) ve χ^2 gibi uyum ölçütleri ile takip edilir. İdeal bir çözümde χ^2 değerinin 1'e yakın olması beklenir. Görsel denetim için ölçülen veri, model yanıtı ve hata dağılımı `'showfit'` komutuyla karşılaştırılabilir.

Sonuçlar ve kullanılan tüm dosyalar `$ bert bert.cfg save` komutu ile tarih ve saat damgalı bir sonuç klasörüne arşivlenebilir.

4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Yerbilimlerinde yer altı katmanlarının özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan Elektriksel Özdirenç Tomografisi (ERT), tahribatsız bir yöntem olması, maliyeti ve yüksek çözünürlüğü ile kullanışlı bir teknik haline gelmiştir. Kuramsal temelleri sağlam bir fiziksel zemine dayanan bu yöntem, sadece statik bir yer altı resmi sunmakla kalmayıp, zaman geçişli (4D) ve frekans bağımlı (SIP) analizlerle yer altındaki dinamik süreçleri, kimyasal değişimleri ve biyolojik aktiviteleri izlememize olanak tanır.

Türkiye gibi heyelan, deprem ve yer altı suyu yönetimi konularında hassas bir coğrafyada ERT; afet risklerinin azaltılması, kentsel planlama ve çevresel koruma stratejilerinin oluşturulmasında temel bir veri kaynağıdır. Ancak yöntemin başarısı, uygun elektrot dizilimi seçimi, titiz arazi çalışması, gelişmiş ters çözüm algoritmalarının kullanımı ve mutlaka diğer verilerle (sondaj, sismik, jeokimya) kontrollü bir şekilde yorumlanmasına bağlıdır. Teknolojik ve algoritmik ilerlemeler devam ettikçe, ERT'nin yer bilimlerindeki ayrım gücü daha da artacaktır.

KAYNAKÇA

- Adebowale, A. E., Jaiyesimi, A., Adujo, A. A., Akinwale, R. (2025). Water seepage investigation using ground penetrating radar and 2D/3D electrical resistivity tomography: A case study. *Scientific African*, 29, e02817.
- Binley, A., Kemna, A. (2005). DC Resistivity and Induced Polarization Methods. In: Rubin, Y., Hubbard, S.S. (eds) *Hydrogeophysics*. Water Science and Technology Library, vol 50. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/1-4020-3102-5_5
- Binley, A., Hubbard, S.S., Huisman, J.A. Revil, A., Robinson, D.A., Singha, K., Slater, L.D. (2015), The emergence of hydrogeophysics for improved understanding of subsurface processes over multiple scales, *Water Resour. Res.*, 51, 3837–3866, doi: 10.1002/ 2015WR017016.
- Cardarelli, E., Cercato, M., Cerreto, A., Di Filippo, G. (2010), Electrical resistivity and seismic refraction tomography to detect buried cavities. *Geophysical Prospecting*, 58: 685-695. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2009.00854.x>
- Dahlin, T. (2001). The development of DC resistivity imaging techniques. *Computers & Geosciences*, 27(9).
- Dahlin, T., Zhou, B. (2004). A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, 52.
- Everett, M. E. (2013). *Near-Surface Applied Geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Griffiths, D. H., & Barker, R. D. (1993). Two-dimensional resistivity imaging and modeling. *Journal of Applied Geophysics*, 29(3-4).
- Günther, T. and Rücker, C. (2006). A general approach for introducing structural information - from constraints to joint inversion. In Ext. Abstract, EAGE Near Surface Geophysics Workshop. 3.-6.9.06, Helsinki(Finland).
- Koda, E., Tkaczyk, A., Lech, M., & Osiński, P. (2017). Application of Electrical Resistivity Data Sets for the Evaluation of the Pollution Concentration Level within Landfill Subsoil. *Applied Sciences*, 7(3), 262. <https://doi.org/10.3390/app7030262>
- Loke, M.H., Barker, R.D. (1996), Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method1. *Geophysical Prospecting*, 44: 131-152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x>
- Loke, M.H. (1999) *Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies: A Practical Guide to 2D and 3D Surveys*. 67 p.
- Loke, M. H., Acworth, I., Dahlin, T. (2003). A comparison of smooth and blocky inversion methods. *Journal of Applied Geophysics*, 51.

- Martinho, E. Electrical Resistivity and Induced Polarization Methods for Environmental Investigations: an Overview. *Water Air Soil Pollut* 234, 215 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06214-x>
- Reynolds, J. M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Wiley.
- Rücker, C. (2011). Advanced electrical resistivity modelling and inversion using unstructured discretization.
- Rücker, C., Günther, T., Wagner, F.M., (2017). pyGIMLi: An open-source library for modelling and inversion in geophysics, *Computers and Geosciences*, 109, 106-123, doi: 10.1016/j.cageo.2017.07.011.
- Talwani, M., Kessinger W. (2003). Exploration Geophysics, Editor(s): Robert A. Meyers, *Encyclopedia of Physical Science and Technology* (Third Edition), Academic Press, s. 709-726, ISBN 9780122274107, <https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00238-6>.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E. (1990) *Applied Geophysics*. 2nd Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 770. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139>



BÖLÜM 10

Jeofizik Mühendisliğinde Yapay Zekâ Araçlarının Kullanımı

Ziya Öncü¹

1. GİRİŞ

Jeofizik mühendisliği; yer içinin yapısını, fiziksel özelliklerini ve dinamik süreçlerini sismik, gravite, manyetik, elektromanyetik, kuyu logu ve uzaktan algılama gibi farklı veri kaynakları üzerinden anlamaya çalışan bir disiplindir. Son yıllarda veri hacmindeki artış, ölçüm tekniklerindeki çeşitlilik ve sayısal hesaplama gücündeki ilerleme, geleneksel yorumlama pratiklerini veri yoğun bir araştırma ortamına dönüştürmüştür. Bunun sonucu olarak yapay zeka araçları, jeofizik iş akışlarının yalnızca yardımcı bir bileşeni değil, veri temizleme, özellik çıkarımı, desen tanıma, modelleme ve karar desteği gibi aşamalarda giderek merkezi bir teknoloji haline gelmiştir (Sheng vd., 2025a; Zhao vd., 2025). Bu araçların kullanımında üç temel evre gözlenmektedir. Birinci evre, fizik temelli ve uzman deneyimine dayanan geleneksel yöntemlerdir. İkinci evre, sınırlı veri kümeleri üzerinde yerel derin öğrenme modellerinin geliştirildiği dönemdir. Üçüncü ve son evre ise, büyük ve çoğu zaman etiketsiz veri havuzları üzerinde ön-eğitim yapabilen, farklı arazilere aktarılabilen temel model (foundation model) yaklaşımıdır (Bergen et al., 2019; Yu & Ma, 2021; Bommasani vd., 2021; Liu vd., 2025). Bu geçiş, jeofizikte yalnızca daha hızlı sonuç üretmek anlamına gelmemekte; aynı zamanda çok modlu verileri ortak temsiller altında birleştirme, etiket bağımlılığını azaltma ve karar süreçlerini yarı-otonom biçimde destekleme anlamına da gelmektedir. Bununla birlikte jeofizik veriler, görüntü ya da düz metin verilerinden farklı olarak güçlü fiziksel anlam, ölçekler arası ilişki, heterojen örnekleme, düşük sinyal-gürültü oranı ve uzman yorumu gereksinimi taşır. Bu nedenle jeofizikte yapay zeka kullanımı, hazır modellerin doğrudan aktarımından çok; veri hazırlama, fiziksel kısıtların gömülmesi, belirsizlik analizi ve yorumlanabilirlik gibi sorunların birlikte çözülmesini gerektirir (Reichstein vd., 2019; Sheng vd., 2025a; Liu vd., 2025).

¹ Dr., Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi
OrçId: 0000-0002-7806-3728

, Aksu MSD Meslek Yüksekokulu

2. KULLANILAN YAPAY ZEKA ARAÇLARI

Jeofizikte kullanılan yapay zeka araçları kabaca dört grupta toplanabilir (Tablo 1);

İlk grup, karar ağaçları, destek vektör makineleri, rassal ormanlar, k-en yakın komşu ve kümeleme gibi klasik makine öğrenmesi teknikleridir. Bu yaklaşımlar, özel uzmanlık gerektiren fasiyes sınıflandırması, anomali analizi, kalite kontrol ve yardımcı nitelik tahmini gibi görevlerde etkilidir. Ancak yüksek boyutlu ham veride karmaşık örüntüleri yakalama kapasiteleri sınırlı kalmaktadır (Bergen et al., 2019; Zhao et al., 2025).

İkinci grup, derin öğrenme mimarileridir. Konvolüsyonel sinir ağları (CNN), sismik kesitlerde ve uzaktan algılama görüntülerinde yapısal örüntü yakalamada öne çıkar; tekrarlayan ağlar ve LSTM zaman serisi ve dalga formu analizlerinde kullanılır; GAN tabanlı ağlar filtreleme, veri tamamlama ve sentetik eğitim verisi üretiminde önemlidir; yapay sinir ağları ise düzensiz örneklenmiş verilerde konum(koordinat, derinlik, uzaklık vb.) ilişkilerin modellenmesinde avantaj sunar (Yu & Ma, 2021; Zhao et al., 2025). Bu mimariler, ilk-varış zamanı seçimi, fay tespiti, jeolojik zaman/horizon çıkarımı, empedans ve hız tahmini gibi işlemlerde kullanılmaktadır (Wu et al., 2019; Geng et al., 2020; Wu & Lin, 2019; Yang & Ma, 2019).

Üçüncü grup, transformer mimarisi etrafında gelişen büyük temel modellerdir. Bu grupta büyük dil modelleri, büyük görsel modeller ve çok modlu modeller yer alır. Temel modellerin belirleyici özelliği, geniş ve çeşitli veri üzerinde ön-eğitim yapılarak öğrenilen yeteneklerin farklı arazide yapılan ölçümlerin çözümünde kullanılması esasına dayanır (Bommasani et al., 2021). Jeofizik alanında bu yaklaşım, GPT-4 türü dil modellerinin rapor, log ve iş akışı metinlerini işlemesi; CLIP benzeri modellerin görüntü-metin hizalaması sağlaması; MAE ve DINOv2 gibi yaklaşımların etiketlenmemiş jeofizik görüntülerden anlamlı sonuçlar üretmesi; SAM türü modellerin segmentasyon görevlerini hızlandırması açısından önem taşır (OpenAI, 2023; Radford et al., 2021; He et al., 2022; Kirillov et al., 2023; Liu et al., 2025).

Dördüncü grup ise ajan/copilot mantığıyla çalışan karar destek araçlarıdır. Bu sistemler, tek bir model yerine veri erişimi, görev yönlendirme, çok modlu sorgulama, yazılım entegrasyonu ve doğrulama katmanlarını birlikte barındırır. Liu et al. (2025), jeofizik copilotu yaklaşımının kuyu logları, sismik kayıtlar ve teknik raporlar arasında köprü kurarak uzman kararını destekleyebileceğini vurgulamaktadır. Bu yönüyle yeni kuşak yapay zeka araçları, sadece

sınıflandırıcı olmaktan çıkıp süreç tasarlayan ve öneri üreten sistemlere dönüşmektedir.

Tablo 1. Yapay zeka araçları ve kullanım alanları

Araç grubu	Tipik örnekler	Başlıca kullanım alanları	Avantaj	Sınırlılık
Klasik makine öğrenmesi	SVM, RF, k-means	Nitelik temelli sınıflandırma, anomali ve kalite kontrol	Düşük veriyle çalışabilir	Yoğun özellik mühendisliği ister
CNN tabanlı derin öğrenme	U-Net, ResNet	Fay/horizon tespiti, fasiyes, gürültü giderme, uzaktan algılama	Uzamsal örüntülerde güçlü	Görev ve saha bağımlılığı yüksektir
Sıralı/transformer modelleri	LSTM, Transformer, ViT	Faz seçimi, zaman serisi, çok izli modelleme, hizalama	Uzun menzilli bağıntıları öğrenir	Eğitim maliyeti yüksektir
GAN ve self-supervised yaklaşımlar	GAN, MAE, contrastive learning	Denoising, enterpolasyon, veri artırma, ön-eğitim	Etiketsiz veriyi kullanır	Kararlılık ve kalite denetimi gerekir
Temel model ve copilot sistemleri	GPT, CLIP, SAM, GeoFM	Çok modlu yorumlama, soru-cevap, iş akışı yönlendirme	Görevler arası aktarım sağlar	Yönetişim ve fiziksel tutarlılık sorunu vardır

2.1. Uygulama Alanları

Yapay zeka araçlarının jeofizikte en görünür uygulama alanı sismik veri işlemedir. Gürültü giderme, veri enterpolasyonu, çözünürlük artırma, ilk-varış zamanı belirleme, hız analizi ve otomatik horizon/fay çıkarımı gibi işlemler derin öğrenme sayesinde önemli ölçüde hızlanmıştır. Düşük frekans ekstrapolasyonu, eksik iz tamamlanması ve ters çözüm tabanlı model güncelleme gibi klasik olarak maliyetli işlemlerde verimli sonuçlar vermiştir (Ovcharenko et al., 2019; Wu & Lin, 2019; Yang & Ma, 2019; Chen & Schuster, 2020; Harsuko & Alkhalifah, 2022). Petrol ve gaz sektöründe; fay tespiti, litofasiyes sınıflandırması ve gerçek zamanlı görüntüleme yapay zeka ile, hız kazanmaktadır (Umoren et al., 2025).

Deprem bilimi, yapay zekanın güçlü biçimde yaygınlaştığı ikinci alandır. Faz seçimi, olay tespiti, büyüklük kestirimi, gürültü bastırma ve erken uyarı

sistemlerinde derin öğrenme modelleri klasik sinyal işleme tabanlı yaklaşımları tamamlar hale gelmiştir. Earthquake Transformer, eşzamanlı deprem tespiti ve faz seçimi için derin öğrenmede dikkat mekanizmasını (attentive deep-learning model) kullanan güçlü örneklerden biridir (Mousavi vd., 2020; Beroza et al., 2021). Yakın dönemde geliştirilen SeisT gibi temel modeller ise, deprem izleme görevlerinde çok görevli ve genellenebilir temsil öğrenmesinin mümkün olabileceğini göstermektedir (Li et al., 2024).

Uzaktan algılama ve yüzey değişimlerinin izlenmesi, yapay zeka ile jeofizik arasındaki üçüncü önemli kesişim alanıdır. Büyük ölçekteki etiketli görüntü koleksiyonları, jeolojik yapıların, yüzey deformasyonlarının, çevresel değişimlerin ve afet izlerinin belirlenmesinde çok güçlü bir eğitim zemini sunmaktadır. fMoW, SatlasPretrain ve RSVG gibi veri kümeleri; nesne algılama, sınıflandırma, yer belirleme ve görüntü-metin hizalaması gibi görevlerin yer bilimlerinde kullanılabilmesini sağlamıştır (Christie et al., 2018; Bastani et al., 2023; Zhan et al., 2023). Bu gelişme, uzaktan algılama verilerinin sismik veya jeolojik açıklama metinleriyle birlikte değerlendirilmesinin de önünü açmaktadır.

Gravite, manyetik, elektrik/elektromanyetik yöntemler ve kuyu logu analizi de yapay zeka uygulamalarının hızla genişlediği alanlardır. Gravite verisinden 3B ters çözüm, elektromanyetik veriden rezistivite yapılarının kestirimi ve kuyu loglarından litoloji/rezervuar özelliklerinin çıkarımı gibi görevlerde derin ağların kullanımına ilişkin çok sayıda örnek vardır (Zhang et al., 2021; Zhao et al., 2025; Sheng et al., 2025a). Burada dikkat çekici nokta, farklı veri türlerinin birbirini tamamlamasıdır. Tek başına her yöntem eksik veya gürültülü bilgi taşıyabilir; ancak yapay zeka, özellikle çok modlu öğrenme ile bu sinyalleri ortak bir yeraltı modeli için de bir araya getirebilir (Sheng et al., 2025a; Liu et al., 2025).

Temel model (foundation model) yaklaşımı, jeofizikteki iki temel soruna doğrudan yanıt vermektedir; yüksek kaliteli etiketli veri kıtlığı ve yerel modellerin sınırlı genellenebilirliği. Jeofizik veri çoğu zaman pahalı, dağınık ve uzman etiketlemesine bağlıdır; buna karşılık onlarca yıllık veri birikimi büyük ölçüde etiketsizdir. Bu durum, kendi kendine gözetimli ön-eğitimi jeofizik alanı için cazip kılmaktadır (Sheng et al., 2025a; Liu et al., 2025).

Jeofizik temel modelinde iş akışı, genellikle veri toplama, veri temizleme ve standardizasyon, veri analizi ve etiketleme, ön-eğitim, çok modlu hizalama, aşağı-akış uyarılama ve dağıtım adımlarından oluşur. Bu süreçte normalizasyon, veri artırma, kalite değerlendirme ve yerel probleme ait ayar parametreleri kritik önemdedir. Bu yaklaşımın en somut örneklerinden biri, Sheng et al. (2025b) tarafından önerilen sismik temel modeldir. Araştırmacılar, dünya genelinden

toplanmış 192 adet 3B sismik migrasyon veri kümesinden 2.286.422 adet 2B sismik görüntü üretmiş ve bunları self-supervised bir transformer mimarisi ile ön-eğitimde kullanmıştır. Elde edilen modelin sismik fasiyes sınıflandırması, tabaka ayrımı, gürültü azaltımı, enterpolasyon ve ters çözüm gibi çok farklı görevlerde taban modellere göre daha ölçeklenebilir ve genellenebilir sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Bu çalışma, jeofizikte “tek görev–tek model” mantığından “genel temsil–çok görev” mantığına geçişin pratik olarak mümkün olduğunu göstermesi bakımından önemlidir.

Liu et al. (2025), temel modelleri jeofizik alanı için hiyerarşik bir yapı içinde açıklamaktadır:

- yerel modeller,
- tek-modlu temsil modelleri,
- çok modlu modeller ve copilot/ajan sistemleri.

Bu çerçeve, jeofizikteki yapay zeka araçlarının yalnızca doğruluk artışı için değil, aynı zamanda iş akışı bütünlleştirme ve uzman kararını destekleme amacıyla da geliştirilmesi gerektiğini ortaya koyar. Özellikle sismik verilerle kuyu loglarının, gravite-manyetik verilerin ve teknik metinlerin ortak bir gömülü uzayda sınıflanması; rezervuar karakterizasyonu, hedef belirleme ve belirsizlik azaltma açısından yeni bir araştırma hattı açmaktadır (Radford et al., 2021; Liu et al., 2025).

Temel modellerin jeofizik için ikinci stratejik katkısı, çok modlu veri kullanımını ölçeklendirmesidir. Jeofizik keşif ve izleme faaliyetleri çoğu zaman aynı saha için sismik, mikro-tremor, gravite, manyetik, elektrik ve kuyu logu verilerini birlikte üretir. Volve, North Sea ve çeşitli CCUS projeleri bu tür çok modlu veri ekosistemlerine örnek olarak gösterilmektedir (Sheng et al., 2025a). Ancak veri biçimleri, örnekleme yoğunlukları ve fiziksel anlam farklılıkları nedeniyle bu kaynakları ortak bir temsile dönüştürmek teknik olarak zordur. Çok modlu temel modellerin vaat ettiği yenilik, bu farklılıkları ortak öğrenme problemine çevirmesidir.

Jeofizikte yapay zeka kullanımının en büyük fırsatı, uzman emeğini ortadan kaldırmadan yüksek hacimli veriyi daha hızlı ve tutarlı biçimde işleyebilmesidir. Özellikle ön-yorum, anomali tespiti, segmentasyon, kalite kontrol ve otomatik raporlama gibi aşamalarda yapay zeka, uzmanın zamanını daha yüksek katma değerli yorum ve karar görevlerine kaydırabilir. Bu durum hem akademik

araştırma hem de saha operasyonları için verimlilik artışı anlamına gelir (Sheng et al., 2025a; Umoren et al., 2025).

İkinci önemli fırsat, etiketsiz verinin ekonomik değere dönüştürülmesidir. Jeofizikte en kıt kaynak, uzman tarafından doğrulanmış etiketli veri; en bol kaynak ise ham kayıtlar ve arşivlenmiş saha verileridir. Self-supervised yaklaşımlar, bu etiketsiz veri tabanını transfer öğrenmeye uygun temsillere dönüştürmektedir (He et al., 2022; Liu et al., 2025). Böylece yeni bir saha ya da görev için sıfırdan model eğitmek yerine, önceden öğrenilmiş temsilleri sınırlı sayıda etiketle uyarlamak mümkün hale gelir.

Üçüncü fırsat, fiziksel önbilginin veri güdümlü modellerle bütünleştirilebilmesidir. Jeofizik, tamamen kara kutu modeller için uygun bir alan değildir; dalga yayılımı, sınır koşulları, kaya mekaniği ve yeraltı sürekliliği gibi fiziksel ilkelerin modele dahil edilmesi gerekir. Bu nedenle fizik beslemeli sinir ağları, neural operator ailesi ve yapılandırılmış derin ağlar geleceğin kritik araştırma alanlarıdır (Reichstein et al., 2019; Wu et al., 2023; Liu et al., 2025). Bu tür yaklaşımlar, yalnızca doğruluğu değil; bilimsel tutarlılığı ve yorumlanabilirliği de artırma potansiyeline sahiptir.

Dördüncü fırsat, copilot ve ajan sistemlerinin kurumsal bilgi ile model bilgisini birleştirebilmesidir. Jeofizik uygulamalarında verinin anlamı çoğu zaman yalnızca sismik kesit içinde değil; kuyu raporlarında, saha notlarında, önceki işlem akışlarında ve jeolojikbilgide saklıdır. Büyük dil modelleri ve çok modlu araçlar, bu dağınık bilgi kaynaklarını sorgulanabilir ve ilişkili hale getirerek daha sağlam karar desteği sunabilir (OpenAI, 2023; Liu et al., 2025).

2.2. Uygulamadaki Zorluklar

Jeofizikte yapay zeka kullanımının önündeki en önemli darboğaz, etiketli veri eksikliği ve verinin heterojen yapısıdır. Derin öğrenme modelleri geniş veriyle beslendikçe daha iyi genellenebilse de, jeofizik veri kümeleri çoğu zaman sahaya özgü ve farklı formatlarda dağınık durumdadır. Bu nedenle ortak veri kümeleri ve standart değerlendirme protokolleri yetersiz kalmaktadır (Yu & Ma, 2021; Sheng et al., 2025a; Liu et al., 2025). Etiketleme sürecinin pahalı olması, özellikle çok modlu temel model geliştirmeyi zorlaştırmaktadır.

İkinci büyük sorun, fiziksel tutarlılık ve yorumlanabilirliktir. Yüksek doğruluk veren bir modelin jeolojik olarak anlamlı veya fiziksel olarak geçerli sonuç üretmesi garanti değildir. Özellikle ters çözüm ve hedef belirleme gibi yüksek riskli uygulamalarda modelin neye dayanarak karar verdiğinin açıklanabilmesi gerekir. Bu nedenle görsel açıklama araçları, belirsizlik kestirimi

ve insan-onaylı iş akışları önemlidir (Reichstein et al., 2019; Liu et al., 2025; Umoren et al., 2025). Jeofizikte yapay zekanın benimsenmesi için “doğru sonuç” kadar “neden doğru olduğu” da önemlidir.

Üçüncü sınırlılık, hesaplama maliyetidir. Büyük modellerin eğitimi yüksek bellek, çoklu GPU/TPU altyapısı, uzun eğitim süreleri ve ciddi finansman gerektirir. Bu durum, özellikle kısıtlı meslek yüksekokulu laboratuvarları ve küçük araştırma ekipleri için engel oluşturur. Temel model yaklaşımının yaygınlaşabilmesi için açık veri, açık model ve kamuya ait veri paylaşımının gelişmesi gerekir.

Dördüncü risk alanı etik, mahremiyet ve yönetişimdir. Jeofizik veriler kimi zaman stratejik rezerv bilgileri, kritik altyapı verileri veya hassas coğrafi bilgiler içerebilir. Bu nedenle veri paylaşımı, model eğitimi ve çıktı dağıtımı aşamalarında gizlilik, tarafsızlık ve izlenebilirlik ilkeleri gözetilmelidir. Özellikle farklı jeolojik ortamlarda eğitilen modellerin başka havzalarda önyargılı sonuçlar vermesi, hatalı sondaj kararları veya yanlış risk değerlendirmeleri üretmesi mümkündür. Bu yüzden yapay zeka sistemleri, test edilebilir ve sorumlu karar destek araçları olarak konumlandırılmalıdır.

Tablo 2. Jeofizikte yapay zeka kullanımının temel zorlukları

Problem	Jeofizik iş akışına etkisi	Önerilen yaklaşım
Etiketli veri kıtlığı	Görev-özgül modeller dar veri üzerinde aşırı uyum gösterebilir	Self-supervised ön-eğitim, transfer learning, pseudo-labeling
Fiziksel tutarlılık eksikliği	Model çıktısı jeolojik olarak mantıklı görünmeyebilir	Fizik bilgilendirmeli ağlar, prior kısıtları, uzman doğrulaması
Yorumlanabilirlik sorunu	Kurumsal güven ve operasyonel kabul zayıflar	XAI araçları, attention haritaları, belirsizlik kestirimi
Kıyas veri eksikliği	Çalışmalar arası kıyas ve yeniden üretilebilirlik düşer	Açık veri kümeleri ve ortak değerlendirme protokolleri
Hesaplama ve finansman yükü	Büyük model eğitimi erişim bariyeri yaratır	Verimli ince ayar, açık modeller, bulut/HPC paylaşımı

3. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Jeofizik mühendisliğinde yapay zeka araçları artık belirli standart görevleri otomatikleştiren yardımcı yazılımlar olmaktan çıkmış; veri toplama-sonrası işleme, yorumlama, modelleme ve karar desteğini yeniden tanımlayan temel bir teknoloji eksenine dönmüştür. CNN, transformer, GAN, self-supervised öğrenme ve temel model yaklaşımı; sismik veri işleme, deprem izleme, uzaktan algılama, gravite-manyetik-elektromanyetik değerlendirme ve kuyu logu analizinde önemli bir ivme oluşturmuştur (Yu & Ma, 2021; Zhao et al., 2025; Liu et al., 2025).

Önümüzdeki dönemde alanın üç yönde derinleşmesi beklenebilir. Birincisi, fizik kısıtlı ve belirsizlik farkında modellerin geliştirilmesidir. İkincisi, sismik, log, metin ve uzaktan algılama verisini birlikte kullanan çok modlu jeofizik temel modellerin olgunlaşmasıdır. Üçüncüsü ise, uzmanı merkezde tutan copilot/ajan sistemlerinin operasyonel yazılımlarla entegrasyonudur (Sheng et al., 2025a; Sheng et al., 2025b; Liu et al., 2025). Dolayısıyla jeofizikte yapay zekanın geleceği, yalnızca daha büyük model kurmakta değil; daha güvenilir, daha açıklanabilir, daha fiziksel ve daha iş akışı uyumlu araçlar tasarlamakta yatmaktadır.

Sonuç olarak, yapay zeka jeofizik mühendisliğinde bir yöntemler kümesi değil, yeni bir araştırma ve uygulama problemidir. Bu problemin çözülmesi; veri ekosistemlerinin açılması, disiplinler arası işbirliği, standart kıyas veri üretimi ve paylaşımın güçlendirilmesi ile mümkün olacaktır.

KAYNAKÇA

- Bastani, F., Wolters, P., Gupta, R., Ferdinando, J., Kembhavi A. (2023). SatlasPretrain: A large-scale dataset for remote sensing image understanding. In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (pp. 16772–16782).
- Bergen, K. J., Johnson, P. A., de Hoop, M. V., & Beroza, G. C. (2019). Machine learning for data-driven discovery in solid Earth geoscience. *Science*, 363(6433), eaau0323.
- Beroza, G. C., Segou, M., Mousavi, S. M. (2021). Machine learning and earthquake forecasting—Next steps. *Nature Communications*, 12, 4761. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24952-6>
- Bommasani, R., Hudson, D. A., Adeli, E., Altman, R., Arora, S., von Arx, S., Bernstein, M. S., Bohg, J., Bosselut, A., Brunskill, E., & vd. (2021). On the opportunities and risks of foundation models. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.07258>
- Chen, Y., & Schuster, G. T. (2020). Seismic inversion by Newtonian machine learning. *Geophysics*, 85(4), WA185–WA200. <https://doi.org/10.1190/GEO2019-0434.1>
- Christie, G., Fendley, N., Wilson, J., & Mukherjee, R. (2018). Functional map of the world. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 6172–6180).
- Harsuko, R., & Alkhalifah, T. A. (2022). StorSeismic: A new paradigm in deep learning for seismic processing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1–15. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3216660>
- He, K., Chen, X., Xie, S., Li, Y., Dollár, P., & Girshick, R. (2022). Masked autoencoders are scalable vision learners. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 16000–16009).
- Kirillov, A., Mintun, E., Ravi, N., Mao, H., Rolland, C., Gustafson, L., Xiao, T., Whitehead, S., Berg, A. C., Lo, W.-Y., & others. (2023). Segment anything. In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (pp. 4015–4026).
- Li, S., Yang, X., Cao, A., Wang, C., Liu, Y., Liu, Y., & Niu, Q. (2024). SeisT: A foundational deep-learning model for earthquake monitoring tasks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62, 1–15. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3371503>
- Liu, Q., Chen, Z., & Ma, J. (2025). Foundation models for exploration geophysics. *Geophysics*, 90(6), H29–H52. <https://doi.org/10.1190/GEO2024-0916.1>

- Mousavi, S. M., Ellsworth, W. L., Zhu, W., Chuang, L. Y., & Beroza, G. C. (2020). Earthquake transformer—An attentive deep-learning model for simultaneous earthquake detection and phase picking. *Nature Communications*, 11, 3952. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17591-w>
- OpenAI. (2023). GPT-4 technical report. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2303.08774>
- Ovcharenko, O., Kazei, V., Kalita, M., Peter, D., & Alkhalifah, T. (2019). Deep learning for low-frequency extrapolation from multioffset seismic data. *Geophysics*, 84(6), R989–R1001. <https://doi.org/10.1190/GEO2018-0884.1>
- Radford, A., Kim, J. W., Hallacy, C., Ramesh, A., Goh, G., Agarwal, S., Sastry, G., Askell, A., Mishkin, P., Clark, J., Krueger, G., & Sutskever, I. (2021). Learning transferable visual models from natural language supervision. In *International Conference on Machine Learning* (pp. 8748–8763).
- Reichstein, M., Camps-Valls, G., Stevens, B., Jung, M., Denzler, J., Carvalhais, N., & Prabhat, F. (2019). Deep learning and process understanding for data-driven earth system science. *Nature*, 566, 195–204. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-0912-1>
- Sheng, H., Wu, X., Gao, H., Di, H., Fomel, S., Li, J., & Si, X. (2025a). On the workflow, opportunities and challenges of developing foundation model in geophysics. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2504.17384>
- Sheng, H., Wu, X., Si, X., Li, J., Zhang, S., Duan, X. (2025b). Seismic foundation model: A next generation deep-learning model in geophysics. *Geophysics*, 90(2), IM59–IM79. <https://doi.org/10.1190/GEO2024-0262.1>
- Umoren, N., Odum, M. I., Digitemie, I. J., & Jambol, D. D. (2025). Artificial intelligence in seismic data processing: Applications, challenges, and future directions in the oil and gas sector. *Engineering Science & Technology Journal*, 6(6), 313–339. <https://doi.org/10.51594/estj.v6i6.1975>
- Wu, X., Ma, J., Si, X., Bi, Z., Yang, J., Gao, H., Xie, D., Guo, Z., & Zhang, J. (2023). Sensing prior constraints in deep neural networks for solving exploration geophysical problems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(23), e2219573120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2219573120>
- Wu, Y., & Lin, Y. (2019). InversionNet: An efficient and accurate data-driven full waveform inversion. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 6, 419–433. <https://doi.org/10.1109/TCI.2019.2956866>
- Yang, F., & Ma, J. (2019). Deep-learning inversion: A next-generation seismic velocity model building method. *Geophysics*, 84(4), R583–R599. <https://doi.org/10.1190/GEO2018-0249.1>

- Yu, S., & Ma, J. (2021). Deep learning for geophysics: Current and future trends. *Reviews of Geophysics*, 59(3), e2021RG000742. <https://doi.org/10.1029/2021RG000742>
- Zhan, Y., Xiong, Z., & Yuan, Y. (2023). RSVG: Exploring data and models for visual grounding on remote sensing data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61, 1–13.
- Zhang, L., Zhang, G., Liu, Y., & Fan, Z. (2021). Deep learning for 3-D inversion of gravity data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1–18.
- Zhao, W., Dai, S., Tian, H., Zhu, D., Zhang, Y., & Jiang, F. (2025). An overview study of deep learning in geophysics: Cross-cutting research to advance geoscience. *IEEE Access*. Advance online publication.